

**MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ**

**LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA**

Ústav nauky o dřevě

**Nerovnoměrná tepelná modifikace bukových vlysů**

*Diplomová práce*



## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci: *Nerovnoměrná tepelná modifikace bukových vlýsů* vypracoval samostatně a veškeré použité prameny a informace jsou uvedeny v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnici o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 Autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity o tom, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne:

.....

**Poděkování:**

Mé poděkování patří především Ing. Aleši Dejmalovi, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady a maximální vstřícnost. Dále bych rád poděkoval Mgr. Zuzaně Paschové, Ph.D. za pomoc s chemickou analýzou i všem těm, kteří se jiným způsobem podíleli na tvorbě této práce. Stejně tak lidem ze svého okolí, kteří mě podporovali během celého studia.

## **Abstrakt**

Dominik Špinár

### **Nerovnoměrná tepelná modifikace bukových vlysů**

Úvod diplomové práce tvoří literární přehled, jehož obsah je obecně zaměřen na tepelnou modifikaci. Komplexně shrnuje informace o její historii, možnostech provedení a dopadech na ošetřený materiál z hlediska chemických, fyzikálních a mechanických změn. Úvodní přehled uvádí i souhrnné informace o zkoumané dřevině buku lesního (*Fagus sylvatica L.*). Shrnutí problematiky vytváří podklad pro praktickou část práce, která je zaměřena na kontaktní, vysokoteplotní úpravu zkoumaných vzorků, která má za účel dosáhnout v průřezu nerovnoměrné modifikace. Ošetřené vzorky byly podrobeny řadě zkoušek a chemické analýze. Získané výsledky byly následně vyhodnoceny a na závěr diskutovány.

Klíčová slova:

buk lesní, vysokoteplotní modifikace, kontaktní ohřev, v průřezu nerovnoměrná tepelná úprava

## **Abstract**

### **Cross – section uneven thermal modification of beech friezes**

The introduction of the thesis consists of a review of literature about thermal modification of wood. More precisely, the author presents history, possible ways of treatments and the impacts on the treated material from the point of view of chemical, physical and mechanical changes. The introduction of the thesis describes the main subject of the research -- European Beech (*Fagus sylvatica L.*). The practical part of the work focuses on a contact high-temperature treatment of the samples. It is intended to achieve in the cross-section uneven modification. The treated samples were chemically analyzed. Finally, the results are evaluated and discussed.

Keywords:

European Beech, High – temperature modification, contact heating, cross – section uneven thermal treated

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>Cíl práce.....</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Literární přehled.....</b>	<b>10</b>
3.1	Vysokoteplotní modifikace dřeva .....	10
3.2	Vývoj tepelné modifikace .....	12
3.2.1	Přehled tepelných modifikací využívaných v Evropě .....	12
3.3	Vliv tepelné modifikace na vlastnosti dřeva .....	14
3.3.1	Chemické změny.....	14
3.3.2	Anatomická struktura.....	15
3.3.3	Fyzikální vlastnosti .....	16
3.3.4	Mechanické vlastnosti.....	21
3.4	Možnosti použití.....	22
3.5	Buk lesní ( <i>Fagus sylvatica</i> L.).....	22
3.5.1	Makroskopická stavba .....	23
3.5.2	Mikroskopická stavba .....	23
3.5.3	Přehled vybraných vlastností buku .....	24
3.5.4	Vlastnosti tepelně upraveného bukového dřeva .....	25
<b>4</b>	<b>Materiál a metodika.....</b>	<b>29</b>
4.1	Seznam použitého vybavení.....	29
4.2	Příprava zkušebních vzorků .....	30
4.3	Rozdělení vzorků do souborů.....	32
4.4	Vysokoteplotní modifikace .....	32
4.5	Stanovení vlastností .....	33
4.5.1	Rovnovážná vlhkost dřeva .....	33
4.5.2	Hmotnost a hustota .....	34
4.5.3	Nasáklivost.....	34

4.5.4	Chemická analýza vrstev .....	35
4.5.5	Tvrдост .....	38
4.5.6	Modul pružnosti a mez pevnosti .....	39
4.6	Barevné změny .....	40
4.7	Interpretace výsledků .....	41
<b>5</b>	<b>Výsledky .....</b>	<b>44</b>
5.1	Rovnovážná vlhkost dřeva .....	44
5.2	Hmotnost .....	46
5.3	Hustota .....	49
5.4	Nasákivost .....	51
5.5	Chemická analýza vrstev .....	54
5.5.1	Obsah monosacharidových látek .....	55
5.5.2	Obsah fenolických látek .....	56
5.6	Mechanické zkoušky .....	57
5.6.1	Tvrдост .....	57
5.6.2	Modul pružnosti v ohybu (MOE) .....	60
5.6.3	Mez pevnosti v ohybu (MOR) .....	63
5.7	Barevné změny .....	66
<b>6</b>	<b>Diskuze .....</b>	<b>68</b>
<b>7</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>Summary .....</b>	<b>74</b>
<b>9</b>	<b>Seznam literatury .....</b>	<b>75</b>
<b>10</b>	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>81</b>
<b>11</b>	<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>83</b>
<b>12</b>	<b>Seznam rovnic .....</b>	<b>84</b>

# 1 Úvod

Dřevo je jedinečný materiál se specifickými vlastnostmi, které ho předurčují k širokému využití počínaje doplňkovými předměty až po několikapatrové stavby s nosnou konstrukcí právě z tohoto nadčasového materiálu.

Člověk začal využívat dřevo a jeho příznivé vlastnosti ve svůj prospěch již v počátcích svého vývoje, kdy si vyráběl jednoduché dřevěné nástroje pro každodenní činnost. Na řadě míst po celém světě bylo právě dřevo tím nejdostupnějším materiálem, proto netrvalo dlouho a člověk začal tuto surovinu využívat k budování obydlí, kde dřevo zastávalo hlavní i vedlejší funkce.

Lidstvo rychle poznalo, že má dřevo oproti jiným materiálům řadu výhod a i dnes jen těžko hledáme materiál, který má podobné charakteristiky. S vývojem lidstva, objevením a výzkumem nových materiálů, rostla dřevu konkurence. Tudíž i od dřeva se začalo očekávat, že jeho dobré vlastnosti převládnu a ty špatné naopak budou potlačeny. Bylo zřejmé, že nároky na něj kladené není možné splnit bez lidského zásahu, kterým je možné ovlivnit vlastnosti dřeva. Úpravy dřeva můžou mít různé podoby a souhrnně jsou označovány jako modifikace. To, že dřevo má i špatné vlastnosti si člověk uvědomoval už v počátcích jeho užívání, proto byla snaha o „primitivní“ modifikace, jako například opalování, napouštění přírodními oleji apod. K seriózním výzkumům úprav na různé bázi za účelem vylepšení vlastností dřeva, popřípadě potlačení těch negativních (nebo obojí najednou), dochází až v novodobé historii lidstva. Některé úpravy se setkaly s úspěchem a jsou u dřeva využívány do dnes, jiné se zase neosvědčily a byly zapomenuty nebo složí, jako inspirace pro další generace. I když se člověk snaží dřevo a jeho vlastnosti upravovat již několik tisíc let, nelze říci, že hledání nových modifikací a vylepšování těch stávajících se chýlí ke konci, ale spíše naopak, jelikož se neustále vyvíjí stále nové a dokonalejší technologie, nároky na materiály stále rostou. Vývoj v této oblasti řídí i pořád silící poptávka po kvalitní surovině, které není dostatek a je velmi drahá. Díky modifikacím je dřevo možné využít tam, kde by to dříve nebylo možné nebo tam, kde dřevo bez dodatečné úpravy vykazovalo pouze omezenou životnost. Zmíněné důvody jsou příčinou, že oblast uplatnění dřeva nebo materiálů na jeho bázi neustále roste.



## 2 Cíl práce

Diplomová práce je postavena na myšlence v průřezu nerovnoměrně upravit bukové dřevo vlivem vysoké teploty. Hlavním cílem tedy je zvolit vhodnou metodu k dané modifikaci a vyhodnotit, na základě praktických zkoušek, jak se tepelná úprava projeví na zkoušených fyzikálních a mechanických vlastnostech.

Vzhledem k tomu, že předmětem práce je aplikovat tepelnou úpravu na dřevěné dílce, které mají reprezentovat bukové podlahové vlasy, budou zkoušky vlastností vycházet ze zkoušek podlahovin. Zkoušky, které jsou stěžejní pro tuto diplomovou práci: stanovení rovnovážné vlhkosti, ztráta hmotnosti, zkouška tvrdosti a ohybové pevnosti. Součástí diplomové práce je i chemická analýza, která má za cíl potvrdit nebo vyvrátit v průřezu nerovnoměrnou tepelnou úpravu.

Závěr bude věnován zhodnocení dané metody, názor autora na možnost využití takto upraveného dřeva v praxi a poskytnout podněty pro další výzkum.

## 3 Literární přehled

### 3.1 Vysokoteplotní modifikace dřeva

Ošetření dřeva vysokou teplotou není novinkou poslední doby, ale metoda, která byla poprvé veřejně představena už téměř před sto lety. Od doby uvedení tohoto produktu bylo nashromážděno mnoho poznatků o tepelné modifikaci, o jejím pozitivním i negativním vlivu na ošetřené dřevo i o dalších věcech, které s úpravou souvisí a konečný výsledek ovlivňují. V dnešní době jsou produkty vysokoteplotní modifikace poměrně snadno dostupné, proto povědomí široké veřejnosti o jejich vlastnostech a možnostech použití v průběhu let neustále stoupá. (Esteves a Pereira 2009)

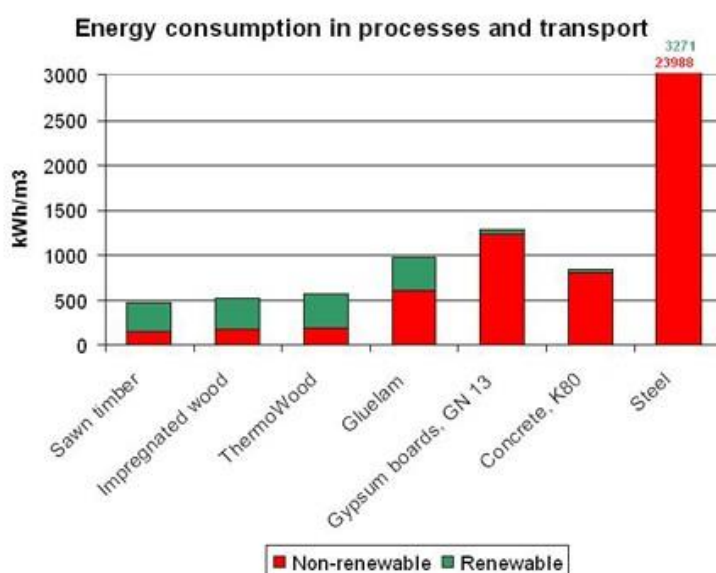
Při tepelném ošetření dřeva je využíváno vysokých teplot, které se pohybují na hraně vznícení hořlavých plynů, které se tvoří při degradaci složek dřeva během tepelného namáhání. Maximální teploty vlastního ošetření závisí na konkrétním procesu, některé využívají teploty pod 200 °C, jiné až 260 °C. Proto je podmínkou, zabránit v době ošetření přístupu vzduchu k modifikovanému materiálu. Z toho důvodu je nezbytně nutné, aby vysokoteplotní úprava probíhala v inertní atmosféře s minimálním obsahem kyslíku. Nejčastěji se využívá prostředí vyplněné vodní párou, podtlakem (vakuum), dusíkem nebo olejem. Z uvedeného vyplývá, že je potřeba proces uskutečnit v hermeticky uzavřené nádobě, kde většinou probíhá i celý proces termické úpravy. (Militz 2002, Rapp 2001)

Existuje více variant termické modifikace dřeva, ale všechny vychází ze základních principů a zákonitostí, které musí být pro zdárný výsledek dodrženy. (Rapp 2001)

- Každá dřevina musí mít individuální sušicí diagram, který je sestaven podle zvláštností chemické struktury a její anatomické stavby. Diagram je ovlivněn i počáteční a konečnou vlhkostí dřeva aj.
- Před aplikací vysokoteplotního sušení, je potřeba dřevo vysušit na nulovou vlhkost.
- Sušení je třeba vykonávat v inertní atmosféře, jelikož se teplota pohybuje na hranici zápalnosti hořlavých plynů, které se ze dřeva uvolňují.

- Na konci modifikace je potřeba postupně redukovat její podmínky tak, aby došlo k egalizaci vlhkosti ve dřevě, kterou je třeba ustálit na konečnou vlhkost použití produktu.

V dnešní době jsou procesy vysokoteplotních modifikací řešeny tak, že během procesu nevzniká žádný odpad, který by nebyl ekologicky odbouratelný, to platí i pro samotný výrobek. Obrázek 1 ukazuje příklad využití obnovitelných zdrojů při výrobě produktů ThermoWood. I to je jeden z důvodů proč poptávka po tepelně upraveném dřevě stále roste, zvláště v dnešní době, kdy je otázka ekologie a souladu života s přírodou poměrně diskutovaným tématem. (Sandberg a Navi 2011)



**Obrázek 1:** Množství energie (Non – renewable / renewable; neobnovitelné / obnovitelné) potřebné na výrobu a dopravu m<sup>3</sup> daného výrobku. (ThermoWood ©2013)

Samozřejmě ekologie není hlavním důvodem jejich rozmachu, ten je dán hlavně vlastnostmi, kterými se takto upravené výrobky prezentují, jako je například zvýšená odolnost a rozměrová stabilita. To, že tepelně upravené dřevo je pro zákazníky žádoucí, můžeme přičítat i barvě, která připomíná některé druhy exotických dřevin. Zvýšená poptávka po tepelně upraveném dřevě vedla ke zrychlení vývoje tohoto procesu a o tuto technologii se začaly zajímat velmocí dřevařského průmyslu. (Esteves a Pereira 2009)

## 3.2 Vývoj tepelné modifikace

Pro dřevo ošetřené vysokou teplotou se vžilo obecné pojmenování „Thermowood“, což není správné, jelikož se jedná o název konkrétního procesu tepelné úpravy, který je produkován ve Finsku. Tento konkrétní proces byl představen na výstavě EXPO 2000 v Hannoveru. První známé pokusy modifikace dřeva vysokou teplotou proběhly o několik desítek let dříve. V roce 1920 bylo představeno takto upravené dřevo i s dopadem na jeho vlastnosti. Po celém světě začaly vznikat různé inovace této úpravy. Například v USA vznikl produkt pod názvem „Staypack“, v Německu zase tepelně upravený, stlačený „Lignifol“ a jiné materiály. (Esteves a Pereira 2009, Hill 2006, Morsing 2000)

Počátky pro tepelně upravené dřevo nebyly snadné. I když zlepšené vlastnosti byly prokázány, tak nejspíše z důvodu snadné dostupnosti kvalitní suroviny, byla poptávka po těchto produktech, na kterých se cenově projevila nákladná modifikace, nízká. Na dřevo modifikované vysokou teplotou se však nezapomnělo, neustále se vyvíjelo a dnes jej můžeme zakoupit i v obyčejných hobby marketech. (Esteves a Pereira 2009, Seborg a kol. 1953)

### 3.2.1 Přehled tepelných modifikací využívaných v Evropě

Nejrozšířenějším dřevěným materiálem v Evropě, který je upraven vysokou teplotou, je produkt procesu ThermoWood, který je aplikován ve Finsku. Není však jediným procesem, který dodává své výrobky na evropský i světový trh. Lze říci, že každý evropský stát, který má rozvinutý dřevařský průmysl, má svojí techniku na výrobu tepelně ošetřeného dřeva. Všechny postupy mají společné, že hlavní fáze modifikace probíhá za vysokých teplot (160 °C – 260 °C), ale každá má svůj odlišný technologický postup a jiné podmínky procesu. (Rapp 2001)

#### **Finsko (ThermoWood)**

Závody na výrobu tepelně upraveného dřeva ve Finsku mají dlouhou tradici už z počátku 90. let, kdy byla otevřena první továrna. Výroba se osvědčila a dnes jich na území Finska funguje hned několik. (Syrjänen a Kangas 2000)

Ohřevu dřeva je docíleno pomocí konvekce vzduchu. Přítomnost vodní páry v procesu slouží zejména k vytlačení vzduchu ze sušárny, ale zvlhčování dřeva během procesu má

i příznivý vliv na potlačení tvorby výsušných trhlin, čímž zvyšuje výslednou kvalitu konečného produktu. (Syrjänen a Kangas 2000)

Ve standardní nabídce společnosti je upravován smrk, borovice, bříza a osika. Smrkové a borovicové prvky jsou nejčastěji určeny pro venkovní použití, bříza a osika zase pro interiéry. Tepelně upravovány jsou i jiné druhy dřeva, ale výjimečně nebo na zakázku. Dřevo určené k sušení musí být vysoké kvality bez významných vad. (ThermoWood ©2013)

#### **Nizozemsko (PLATO – PROCESS)**

Závod na tepelnou modifikaci, který nese obchodní značku Plato, byl otevřen v roce 2000 v Nizozemí. Tento způsob úpravy byl poprvé popsán ve vědecké publikaci v roce 1989 a jeho autorem byl Herman Ruyter. (Boonstra 2008, Tjeerdsma a kol. 1998b)

Vlastní tepelná modifikace je provedena ve dvou krocích a při vysoké teplotě v přítomnosti nasycené páry za zvýšeného tlaku, druhý krok je aplikace vysoké teploty za normálních podmínek. Mezi těmito fázemi a před nimi je fáze sušení, na konci procesu dochází k egalizaci dřeva. (Boonstra 2008, Tjeerdsma a kol. 1998b)

Proces je zaměřen na dřeviny topolu, smrku a exotické dřeviny fraké. (Platowood ©2015)

#### **Francie (Retification a Le Bois Perdure)**

Jedná se o dva samostatně vyvinuté procesy tepelné modifikace, používané ve Francii.

Retification byl vyvinut v Saint – Etienne společností Ecole des Mines. Patenty na tepelnou modifikaci dřeva touto metodou, získala v roce 1997 firma NOW (New Option Wood), spíše známá pod jménem RETITECH.

K tepelné úpravě se používá předsušené dřevo na 12% vlhkost. Samotná modifikace pak probíhá při teplotách od 210 °C do 240 °C v inertní atmosféře, kde je kyslík nahrazen dusíkem. (Esteves a Pereira 2009)

Druhý z procesů Le Bois Perdure, vznikl ve Francii v polovině 90. let ve společnosti BMI, tuto společnost koupila v roce 2000 jiná francouzská společnost a vznikl koncern PCI Industries inc.

Celý proces je složen ze tří fází, kde se postupně odstraňuje voda volná, pokud dřevo není předsušeno, voda vázaná a nakonec je provedeno samotné ošetření při 230 °C v prostředí vodní páry. (Esteves a Pereira 2009)

Společnost se zaměřuje na úpravu dřeva smrku, borovice, břízy a topolu. (Perdure ©2003)

**Německo** (OHT proces – Menz Holz)

Vynálezcem metody OHT (Oil – Heat – Treatment) byl Prof. Dr. A. O. Rapp. Název napovídá, že se tato metoda liší od ostatních tím, že je modifikace prováděna za přítomnosti rostlinných olejů, přesněji olejové lázně, ve které je dřevo během úpravy naloženo. (Rapp 2001, Sailer a kol. 2000)

### **3.3 Vliv tepelné modifikace na vlastnosti dřeva**

#### **3.3.1 Chemické změny**

Chemická struktura dřeva je složena převážně ze tří látek: celulóza, hemicelulózy a lignin, proto se o dřevu hovoří, jako o ligninocelulóзовém materiálu. Tyto látky mají základní podíl na tvorbě buněčných stěn dřevních elementů i na vyplnění mezibuněčných prostor. V menší míře jsou ve dřevě zastoupeny i extraktivní látky. (Gandelová a Šlezingerová 2014)

První změna, která se ve struktuře dřeva během tepelné modifikace odehrává, je desorpce vody volné, ta se ze dřeva začíná postupně uvolňovat již při 20 °C, proces pokračuje uvolňováním vody vázané. Od teplot kolem 150 °C a vyšších, dochází ve dřevě k chemickým procesům, které mění jeho chemickou strukturu již nevratně. Dochází k postupné degradaci hlavních složek a extraktivních látek. Překročení hranice 250 °C dochází ve dřevě k procesu karbonizace za uvolnění CO<sub>2</sub> a jiných pyrolýzových produktů. Chemické změny jsou ovlivněny zejména teplotou, ale i délkou trvání procesu a dalšími podmínkami, které proces ošetření doprovázejí. (Bourgeois a kol. 1989, Esteves a Pereira 2009)

Nejnižším teplotám jsou schopny odolávat **hemicelulózy**, které se jako polysacharidy štěpí, vlivem tepelného namáhání, na jednoduché sacharidy. Mimo to se při zahřívání uvolňují v řetězcích obsažené kyseliny, zejména pak kyselina octová, tyto látky

napomáhají při rozkladu dalších polysacharidů. Rozkladem hemicelulóz vznikají i VOC láky jako formaldehyd, furfural a další aldehydy. Někteří autoři (Mayes a Oksanen 2002) uvádějí, že koncentrace VOC látek u tepelně upraveného dřeva je podstatně nižší než u dřeva přirozeně vysušeného. Další významnou změnou je snížení počtu volných hydroxylových skupin, které jsou schopny na sebe vázat molekuly vody, tím je významně ovlivněna rovnovážná vlhkost. (Nuopponen a kol. 2004, Sivonen a kol. 2002, Tjeerdsma a kol. 1998a)

**Celulóza** je podstatně odolnější vůči vysokým teplotám, a to hlavně díky většímu podílu krystalické struktury. Degradují především amorfní části celulózy, které mají větší potenciál k navázání vody do své struktury než složité řetězce tvořící neproniknutelnou krystalickou strukturu. Následkem rozkladu neuspořádaných částí celulózy je pokles OH skupin. Stejně jako hemicelulózy je celulóza polysacharid a při jejich tepelném namáhání vznikají z řetězců polysacharidů jednoduché cukry. Degradaci polysacharidů se výrazně sníží obsah látek, které slouží jako potrava pro biologické škůdce dřeva, i to je jedna z příčin zvýšené odolnosti. (Boonstra a Tjeerdsma 2006b, Esteves 2008b)

Nejodolnější chemickou strukturou ze všech tří hlavních složek je **lignin**, který významně degraduje až při teplotách přesahujících 300 °C. Vzhledem k tomu, že vysokoteplotní úprava takto vysokých hodnot zpravidla nedosahuje, dochází k celkovému navýšení podílu ligninu oproti dalším složkám dřeva. Tato skutečnost ovšem neznamená, že degradační proces se u ligninu vůbec neprojeví, rozklad jeho méně odolných částí nastává již od teplot, které se pohybují kolem 200 °C. Produktem degradace ligninu jsou fenolické látky, které přispívají k další degradaci polysacharidových složek dřeva. (Boonstra a Tjeerdsma 2006, Esteves a kol. 2008b)

Většina **extraktivních látek** se ze dřeva vypaří nebo jsou rozloženy na jednoduché složky, které na konečné vlastnosti dřeva nemají významný vliv. (Bourgois a kol. 1989)

### 3.3.2 Anatomická struktura

Rozsah vlivu vysokoteplotní úpravy se mění s anatomickou strukturou jednotlivých dřevin. Obecně platí, že jehličnaté dřeviny mají výrazně jednodušší strukturu, než je tomu u listnatých stromů. Výrazně by se tepelná úprava mohla projevit u různých vad dřeva, jako jsou trhliny, suky, deformace apod. Z důvodu náhlé změny anatomické

struktury. Proto není řezivo s významným výskytem vad pro tepelnou úpravu vhodné. (Boonstra 2006a, Gandelová a Šlezingerová 2014)

Rozsah změn v anatomické struktuře dřeva ovlivňují podmínky, při kterých proces probíhá i konkrétní druh upravovaného dřeva. Narušení struktury je zejména ve formě trhlin v buněčné struktuře anatomických elementů, konkrétně pak mezi S1 a S2 vrstvou buněčných stěn, ve střední lamelle a v rozích buněk. Tepelná modifikace ovlivňuje i další elementy, jako je například porušení ztenčenin, perforací apod. (Fengel a Wegener 1989, Hietala a kol. 2002)

### 3.3.3 Fyzikální vlastnosti

#### Rovnovážná vlhkost dřeva

Nejvýznamnější dopad vysokoteplotní modifikace, z pohledu konečných vlastností, je vliv na rovnovážnou vlhkost dřeva (RVD), tato charakteristika významně ovlivňuje možnosti využití takto upravených produktů. Dřevo je porézní materiál, díky tomu je schopné přijímat a odevzdávat vlhkost podle podmínek v jeho okolí tak, aby byly atmosférické tlaky v prostředí a ve dřevě v rovnováze. Přijímání a odevzdávání vlhkosti může mít za následek rozměrovou nestabilitu. Díky tepelné úpravě je možné RVD redukovat o několik procent. (Esteves a Pereira 2009, Horáček 2008)

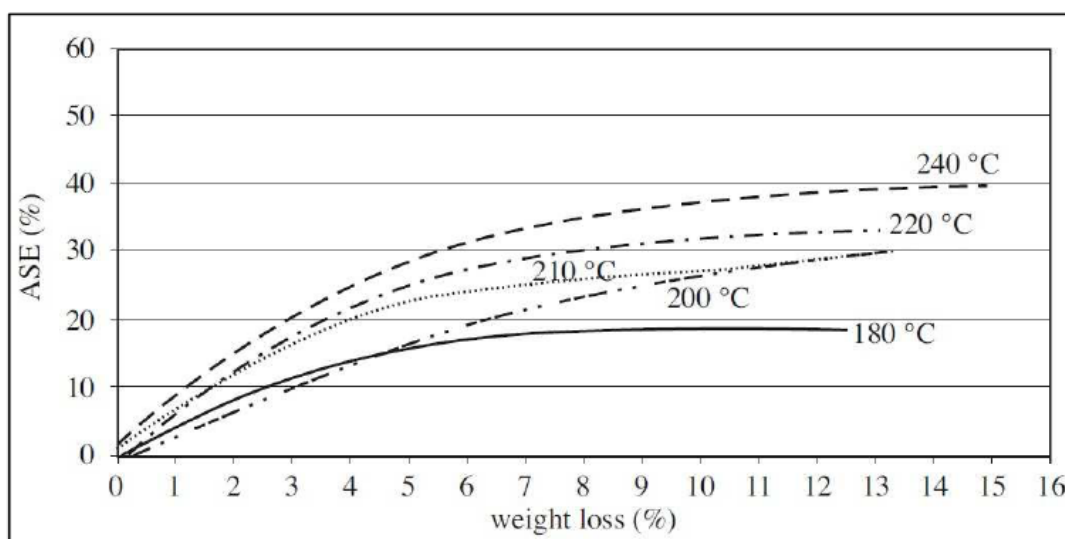
K poklesu RVD dochází až při teplotách, které přesahují 100 °C, konkrétní teplota je ale závislá na druhu dřeviny, respektive její anatomické struktuře. Hlavním důvodem snížení RVD upravených dřevin vysokou teplotou je odbourávání volných hydroxylových skupin, které jsou zodpovědné za vázání molekul vody ve dřevě. Dalším spolupůsobícím faktorem je navýšení podílu krystalické struktury, do které molekuly vody neproniknou. Se změnou vlhkosti a teploty v okolí dřeva se mění i jeho obsažená vlhkost, to platí jak pro ošetřený, tak pro neošetřený materiál, s tím rozdílem, že upravené dřevo má RVD výrazně nižší. Standardně se RVD, při standardních podmínkách (20 °C a 60 % vlhkosti), po tepelné úpravě pohybuje v řádu jednotek procent, zatímco neupravené dřevo za těchto podmínek dosahuje zhruba 12 % vlhkosti. Tepelná úprava ovlivňuje množství vlhkosti ve dřevě, ale křivka sorpčního izoterma zůstává neměnná. (Horáček 2008, Jämsä a Viitaniemi 2001, Kamdem a kol. 2002, Kollmann a Shneider 1963)



## Rozměrová stabilita

Chemické změny, které se ve dřevě uskuteční po jeho vystavení teplotě nad 150 °C, vedou ke snížení relativní vlhkosti dřeva, s čímž úzce souvisí zvýšení jeho rozměrové stability. Díky tepelné modifikaci lze, jak uvádějí někteří autoři, zvýšit rozměrovou stabilitu až o 75 %. (Esteves a Pereira 2009, Burmester 1973)

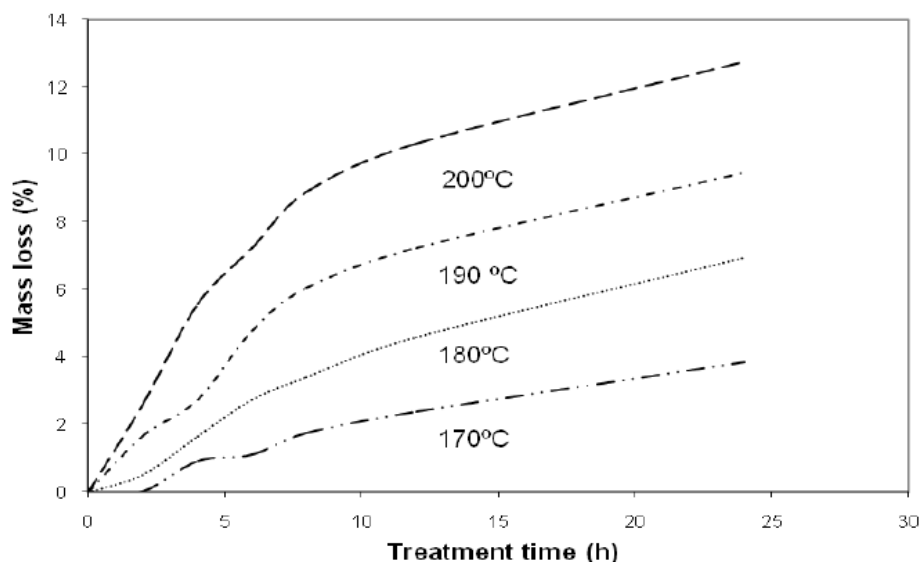
K definování změny rozměrové stability upraveného dřeva se využívá mezinárodní index účinnosti ASE (anti – shrinking efficiency = účinek proti sesychání), který procentuálně vyjadřuje rozdíl, mezi bobtnáním upraveného a neupraveného dřeva. (Esteves a Pereira 2009)



**Obrázek 2:** Závislost mezi ASE (účinek proti sesychání), teplotou modifikace a úbytkem hmotnosti (weight loss) pro *Picea abies*. (Welzbacher a kol. 2007)

## Hmotnostní ztráta

Úbytek hmotnosti je považován za jeden ze základních znaků tepelné úpravy, podle tohoto kritéria lze rozeznávat jakost procesu i ošetřeného dřeva, protože se významně podílí na jeho výsledných vlastnostech. Není snadné předvídat hmotnostní úbytek u konkrétního procesu, jelikož se na tomto faktoru projevuje mnoho proměnných: druh dřeva, teplovodní médium, teplota ošetření, doba jejího působení, počáteční a konečná vlhkost vstupujícího materiálu apod. Úbytek hmotnosti se může pohybovat v rámci jednotek, ale i desítek procent, přičemž na výslednou ztrátu hmotnosti má větší vliv teplota úpravy než doba trvání procesu. Vliv času a teploty na úbytek hmotnosti, v případě borovice, ukazuje graf na obrázku 3. (Esteves a Pereira 2009)



**Obrázek 3:** Závislost mezi časem úpravy a ztrátou hmotnosti při různých teplotách pro borovici. Treatment time = čas úpravy; Mass loss = hmotnostní ztráta. (Esteves a kol. 2008a)

### Odolnost

Schopnost jednotlivých druhů dřev odolávat biotickému napadení je různá, ale za určitých podmínek je náchylná jakákoliv dřevina, což znevýhodňuje dřevěné produkty oproti konkurenčním materiálům. Tepelná modifikace pomáhá rezistenci dřeva výrazně zvýšit a tak rozšířit možnosti jeho aplikace.

Díky úpravě dřeva vysokou teplotou je možné zvýšit odolnost proti většině druhů hnilob, plísní, dřevozbarvujícím houbám i dřevokazným broukům. Četné výzkumy potvrdily, že biologická odolnost je u ošetřeného dřeva významně zvýšena. Nejprůkaznějším testem je umístit vzorek do prostředí, které je kontaminováno konkrétním biotickým činitelem a po určité době vyhodnotit úbytek hmotnosti vzorku. Tento typ zkoušky prokázal výrazné zvýšení odolnosti, jako příklad lze uvést srovnání mezi neupraveným vzorkem, který vykazoval pokles hmotnosti 50 % až 70 % oproti ošetřenému vzorku 1 % až 12 %. Faktory, které ovlivňují konečnou odolnost: způsob a průběh tepelné úpravy, druh dřeviny, druhu biologického napadení apod. (Boonstra a kol. 2007, Tjeerdsma a kol. 2000, Welzbacher a Rapp 2002)

Žádný výrazný vliv neměla tepelná úprava v případě odolnosti proti hnilobám působící na dřevo, které je v kontaktu se zemí, z toho důvodu se pro tyto aplikace nedoporučují. (Kamdem a kol. 2002)

Tepelně upravené dřevo se řadí do tříd použitelnosti, které jsou dány evropskou normou ČSN EN 335. Tato norma obsahuje celkem 5 tříd ohrožení, přičemž s ohledem na vlastnosti tepelně upraveného dřeva, jsou využívány pouze první tři.

**Tabulka 1: Zjednodušená tabulka klasifikace tříd ohrožení v kombinaci s třídami odolnosti pro dřevo. (ČSN EN 335)**

Třída ohrožení	Třída ohrožení dle ČSN EN 335 - 2		
	podmínky uložení dřeva	Prostředí	Požadovaná třída odolnosti
1	Vlhkost dřeva od 10 do 20 %	Neklimatizované suché interiéry	5 nebo lepší
2	Vlhkost dřeva někdy může vlhkost překročit 20%	Neklimatizované prostory i s relativní vlhkostí vzduchu vyšší než 80 %	3 nebo lepší 4 a 6 popř. impregnace
3	Vlhkost dřeva často nad 20 % + působení povětrnosti	Exteriéry, ale bez kontaktu se zemí	2 nebo lepší 3 popř. impregnace 4 a 5 impregnované
4	Vlhkost dřeva stále nad 20% + působení povětrnosti a kontakt se zemí	Dřevo zabudované do země/vody i částečně	1 2 popř. impregnace 3 až 5 impregnované
5	Vlhkost dřeva stále nad 20 % + působení mořské vody	Dřevo zabudované do mořské vody i částečně	1 2 až 5 impregnované

Zvýšená rezistence je způsobena zejména díky dvěma faktorům, těmi jsou, snížená hygroskopicitata, která vede ke snížení obsahu vody ve dřevě. Jak je obecně známo, veškeré biologické formy vyžadují ke svému životu zpravidla poměrně vysokou vlhkost, která je snížením RVD výrazně omezena. Druhým faktorem je, že některé molekuly mohou během tepelné úpravy reagovat s řetězcí ligninu, čímž se stanou pro enzymy hub nerozložitelné. K tomu přispívá i změna hemicelulózových hydrofilních řetězců, které jsou pro enzymy hub snadno stravitelné, na hydrofobní těžce rozložitelné. (Militz 2002, Tjeerdsma a kol. 2002, Weiland a Guyonet 2003)

Smáčivost povrchu, lepení a povrchová úprava

Další z vlastností, která je úpravou ovlivněna, je smáčivost povrchu. Působení tepelného média na dřevěný materiál způsobí, že kapalina s jeho povrchem svírá větší kontaktní úhel. Nízká smáčivost vede k rychlejšímu odvedení kapaliny z povrchu, což je žádoucí v řadě instalací a to zejména v exteriéru. V interiérech tuto vlastnost oceníme

v místnostech jako je koupelna nebo kuchyně. Činitelem zvýšené hydrofobnosti je zvýšený podíl krystalického uspořádání molekul v chemické struktuře a pravděpodobně i plastifikace ligninu. Nejvyšší pokles smáčivosti povrchu dřeva nastává při úpravě teplotami 130 °C – 210 °C. (Pecina a Paprzicki 1988, Pétrissans a kol. 2003)

Zvýšená hydrofobnost povrchu dřeva má vliv i na aplikaci některých ošetřujících látek a lepidel. Existují studie, které doporučují pro upravené dřevo aplikaci látek přímo pro ně určené, právě kvůli rozdílné smáčivosti, absorpci povrchu a změnou pH. (Esteves a Pereira 2009, Vernois 2000)

#### Vystavení klimatickým vlivům

Jak již bylo uvedeno, tepelně upravené dřevo je vhodné pro použití do venkovní expozice a oproti neupravenému dřevu mimo jiné dosahuje i vyšší odolnost proti povětrnosti. Tato skutečnost je dána zvýšením podílu krystalické struktury složek dřeva, která zpomaluje jejich fotodegradaci a následné vyplavování. To je způsobeno zvýšenou hydrofobicitou dřeva, která omezuje průnik vody do dřeva a snižuje dobu, po kterou se voda drží na jeho povrchu. (Feist a Sell 1987, Jämsä a Viitaniemi 2001)

Ošetřené dřevo je schopno lépe snášet zátěž venkovního prostředí i díky zvýšené rozměrové stabilitě, která vede k redukci zátěže na povrchovou úpravu. Při změně rozměrů dřeva dochází k narušení vytvořeného filmu, který se po čase stává neúčinným. Právě tento jev je u ošetřeného dřeva významně omezen a díky tomu je doporučovaný interval pravidelné údržby několikanásobně delší. (Vernois 2000)

Vyšší odolnost a stabilita složek dřeva vůči přírodním vlivům souvisí i s vyšší barvostálostí. V porovnání s neupraveným dřevem dochází k pozvolnější změně odstínů, není však možné úplně zamezit zešednutí povrchu stejně jako je tomu u dřev, které neprošli modifikací. (Ayadi a kol. 2003)

#### Barevné změny a tepelná vodivost

Jedinou změnou, která je patrná prostým okem, je barevný rozdíl, který podle podmínek úpravy a druhu dřeva přechází do tmavších odstínů. Odstíny mohou být od lehce až po sytě tmavou s tím, že zůstávají zachovány přechody mezi jarním a letním dřevem a jeho další přirozená kresba. Za barevné změny je odpovědná degradace hemicelulóz,

extraktivních látek a vznik chinonů. (Militz 2002, Sundqist 2004, Tjeerdsma a kol. 1998a, Viitaniemi a kol. 1997)

Tepelnou vodivost úprava snižuje o 20% až 25 %, což může být také přínosem pro některé aplikace. (Mayes a Oksanen 2002)

### 3.3.4 Mechanické vlastnosti

Dosud se psalo o pozitivních dopadech tepelné úpravy, nicméně termická modifikace s sebou přináší i negativní vliv na ošetřené dřevo a to je pokles některých mechanických vlastností. Uvedený fakt postihuje využití tepelně upraveného dřeva a to zejména v oblasti nosných konstrukcí, do kterých tento materiál není doporučený. Pokud je přece jen využito pro nosné účely, musí se s tímto omezením počítat a je potřeba, v závislosti na to, přizpůsobit dimenze prvků. (Esteves a Pereira 2009)

#### Ohybová pevnost

Mechanické vlastnosti lze určit pomocí statických a dynamických zkoušek. Nejběžnější metodou, která popisuje mechanické vlastnosti dřeva, je zkouška tří – bodým ohybem, ta spadá do kategorie statických metod. Z grafu tří bodého ohybu, který znázorňuje závislost mezi deformací a napětím, lze odečíst mez pevnosti (MOR – Modulus Of Rupture) a modul pružnosti (MOE – Modulus Of Elasticity). Jednou z nejvíce postižených mechanických vlastností je právě MOR. MOR u tepelně upravených vzorků klesá i více než o 50 %, ale výsledek je individuální podle dřeviny, podmínek tepelné úpravy apod. (Esteves a Pereira 2009, Bengtssons a kol. 2002)

U modulu pružnosti jsou rozdílné výsledky, ale většina studií se shoduje, že při mírnějším procesu za nižších teplot hodnota MOE mírně roste, přičemž u tvrdých procesů úpravy naopak klesá. (Esteves a Pereira 2009)

#### Jiné mechanické vlastnosti

Pro další mechanické vlastnosti, jako je pevnost v tlaku, tah, tvrdost, rázová houževnatost, byly stanoveny rozporuplné výsledky různými autory. Rozdílné výsledky byly pravděpodobně získány díky mnoha faktorům, které konečný produkt a jeho vlastnosti ovlivňují. (Boonstra a kol 2007b, Korkut a kol. 2008, Unsal a Ayrimis 2005, Yildiz 2002)

Mechanické vlastnosti u upraveného dřeva nejvíce ovlivňuje rozklad hemicelulózových řetězců na složky s jednoduchou strukturou, které nejsou tak stabilní, jako původní pevná struktura. Na mikroskopické úrovni dochází během působení vysokých teplot k narušení buněčných stěn, i to je jedna z příčin snížení mechanických vlastností. Naopak během modifikace dojde k vyššímu zasíťování ligninu, což má pozitivní vliv na mechanické vlastnosti v axiálním směru. Předpokládá se, že snížení obsažené vody ve dřevě může také přispívat k lepším výsledkům, nicméně kladné účinky na mechanické vlastnosti jsou ve většině případů převáženy těmi negativními. (Boonstra 2007a, Esteves a kol. 2008a)

### **3.4 Možnosti použití**

Tepelně upravené dřevo má díky svým vlastnostem rozsáhlou oblast uplatnění, kterou omezuje vyšší cena, která je dána poměrně vysokými náklady na tepelnou úpravu, a pokles mechanických vlastností. Pozitivní vlastnosti předurčují ošetřené dřevo k exteriérové i bazénové aplikaci jako jsou podlahy, ploty, fasády, okna, dveře, zahradní nábytek, ale jsou využívány i jako interiérové prvky například nábytek, dekorace, vnitřní obložení saun apod.

Pokud by výsledný produkt nebyl pro konečné spotřebitele vizuálně atraktivní, tak i vlastnosti, kterými disponuje, by mu nezaručily postavení na trhu jaké má nyní. Vzhled masivního dřeva sám o sobě je nadčasový a díky tmavším tónům připomíná druhy žádaných a těžce dostupných exotických dřevin, i to je příčina stoupající obliby.

### **3.5 Buk lesní (*Fagus sylvatica* L.)**

Jedná se o druhou nejrozšířenější listnatou dřevinu na našem území, která se řadí do čeledi bukovitých (*fagaceae*). Roste takřka po celé Evropě a v její východní části na něj navazuje buk východní. V České republice se vyskytuje v nadmořských výškách od 400 m n.m. do 1000 m n.m. V lesním porostu je zastoupen 6,2 %. Díky svým vlastnostem je jednou z nejvíce zpracovávaných dřevin, jak u nás tak v Evropě. Charakteristickým rysem, je stříbřitě šedá hladká kůra. Vzrostlý strom má většinou úzký protáhlý kmen, ale u starších kusů může poloměr kmene dosáhnout i přes 1 metr. Výška stromu dosahuje i nad 40 metrů a jeho vegetační život se pohybuje okolo 400 let. Plodem buku jsou bukvice. (Barna a kol. 2011, Šlezingerová a Gandelová 1999)

Buk lesní je díky svým vlastnostem a narůžovělému nádechu významnou surovinou na výrobu interiérových produktů. Z buku se vyrábí podlahoviny, nábytek, dýhy, doplňkový sortiment pro nářadí a další řada výrobků. Hojně je využíván na výrobu ohýbaného nábytku. Dobré mechanické vlastnosti z něj udělali vhodnou surovinou pro výrobu železničních pražců. Buničina se využívá na výrobu papíru. Nevýhodou buku je náchylnost na prudkou teplotní změnu, na kterou reaguje tvorbou trhlin, proto není vhodný k sušení nebo vyžaduje pozvolný nárůst teplot. (Barna a kol. 2011, Šlezingerová a Gandelová 1999)

### 3.5.1 Makroskopická stavba

Dřevo buku je světlé barvy s lehkým odstínem růžové až červenohnědé. I když se jedná o bělové dřevo, tak některé výřezy mohou obsahovat nepravé jádro, které je tmavší barvy. Makroskopicky výrazným poznávacím rysem jsou dřeňové paprsky, které jsou viditelné na všech jeho řezech. Na tangenciálním řezu jsou viditelné ve formě krátkých (několik mm dlouhých) větven, v radiálním ve formě „zrcátek“ a v příčném řezu se projevují jako čáry kolmé na letokruhy. Buk je řazen do skupiny roztroušeně pórovitých dřevin. (Barna a kol. 2011, Gandelová a Šlezingerová 2014)

### 3.5.2 Mikroskopická stavba

Listnaté dřeviny obecně se skládají ze tří druhů anatomických elementů: (Gandelová a Šlezingerová 2014)

**Cévy** plní zejména transportní funkci ve dřevě, ale i částečně i mechanickou. V případě buku je možné rozpoznat v radiálním řezu žebříčkové perforace popř. v příčném řezu thyly v nepravém jádře.

**Libriformní vlákna**, tyto elementy zastupují mechanické funkce. Tvoří převážnou část (asi 50–60 %) anatomie dřeva. Nemají význam pro rozpoznání druhu.

**Parenchymatické buňky** jsou hranolovitého nebo větvenovitého tvaru, vytváří dřeňové paprsky a axiální dřevní parenchym. Funkce buněk je pomocná vodivá nebo zásobní. Pro buk jde o nejvýznamnější určovací element, v tangenciálním řezu rozpoznáváme větvena s počtem 1–25 parenchymatických buněk.

## Chemické složení

Základními stavebními složkami všech dřevin jsou celulóza, hemicelulózy a lignin, které tvoří buněčné stěny a vyplňují mezibuněčné prostory. Obsah základních látek ve dřevě je 90–97 %, zbývající podíl zaujímají extraktivní látky. ((Gandelová a Šlezingerová 2014)

Obecné zastoupení hlavních složek u jednotlivých druhů dřev je těžké stanovit, jelikož se jejich podíl mění v závislosti na růstových podmínkách a jiných faktorech.

**Celulóza** je obsažena asi z 35–55 % a zastává významný podíl v buněčných stěnách, kde plní jejich stavební funkci. Uspořádání a obsah celulózy významně ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva.

**Hemicelulózy** (20–35 %) neboli souhrnné označení dalších polysacharidů, které jsou obsaženy ve dřevě, doplňují celulózu v jednotlivých vrstvách buněčných stěn a působí, jako spojovací činitel mezi ligninem a celulózou. Ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva, zejména při paření, vaření, lisování a sušení dřeva.

**Lignin** (15–36 %) je po celulóze nejvýznamnější polymer. Díky své plastické struktuře je schopen vyplnit mezicelulózové prostory. Největší zastoupení má ve střední lamelle a primární buněčné stěně. Lignin je zodpovědný za dřevnatění dřeva neboli lignifikaci, díky jeho ukládání do buněčných stěn anatomických elementů. Tento jev ovlivňuje hustotu dřeva a jeho propustnost. Z hlediska tepelné odolnosti je na tom nejlépe z výše zmíněných složek. (Gandelová a Šlezingerová 2014)

### 3.5.3 Přehled vybraných vlastností buku

Hustota dřevin významně ovlivňuje fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva. Bukové dřevo s průměrnou hustotou  $680 \text{ kg/m}^3$  v absolutně suchém stavu je řazeno do vyšší objemové třídy ze škály tuzemských dřevin (vyšší průměrnou hustotu má pouze dřevina habru a akátu). Mechanická odolnost je do značné míry ovlivněna obsaženou vlhkostí ve dřevě a to zejména v rozsahu meze nasycení buněčných stěn (MNBS), která je v rozmezí 22–35 %, kdy hodnoty od nuly směrem k MNBS lineárně klesají.



**Tabulka 2:** Výtah vybraných fyzikálních vlastností buku ze světových literatur, zabývající se danou problematikou

Fyzikální vlastnosti	Světová literatura			
	Lexa (1952)	Kollman a kol. (1951)	Požgaj a kol. (1993)	Wagenfuhr (2000)
Hustota při 0 % vlhkosti [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	680	680	684	680
Hustota při 12 % vlhkosti [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	710	720	-	720
Bobtnání/sesychání podélné [%]	0,3	0,3	0,3	0,3
Bobtnání/sesychání radiální [%]	5	5,8	5,3	5,8
Bobtnání/sesychání tangenciální [%]	11,8	11,8	12,5	11,8
Bobtnání objemové [%]	17,5	17,9	17,5	17,9

**Tabulka 3:** Výtah vybraných mechanických vlastností buku ze světových literatur, zabývající se danou problematikou ( $\parallel$  - podélný směr,  $\perp$  - kolmý směr)

Mechanické vlastnosti při 12 % vlhkosti	Světová literatura			
	Lexa (1952)	Kollman a kol. (1951)	Požgaj a kol. (1993)	Wagenfuhr (2000)
Mez pevnosti v ohybu $\parallel$ [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]	53	62	56,7	62
Mez pevnosti v tlaku $\perp$ [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]	-	-	8,5 - 12,9	-
Modul pružnosti v tlaku [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]	16000	16000	16837	16000
Mez pevnosti v tahu $\parallel$ [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]	135	135	135,5	135
Mez pevnosti v tahu $\perp$ [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]	7	7	3,4 - 4,4	7 - 10,7
Mez pevnosti v ohybu [ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ ]	105	123	124	123

### 3.5.4 Vlastnosti tepelně upraveného bukového dřeva

Tepelná úprava buku není úplně běžnou záležitostí. Bukové dřevo má samo o sobě poměrně dobré vlastnosti a jeho uplatnění najdeme spíše v interiérech budov. Navíc pro tepelnou úpravu se nejedná vysloveně o vhodnou dřevinu, jelikož je náchylná na tvorbu výsušných trhlin, proto musí být proces úpravy velmi pozvolný a časově náročný. Vzhledem k ceně surového bukového dřeva se proces stává, v porovnání běžně používaných dřevin, nákladný. (Barna a kol. 2011, Šlezingerová a Gandelová 1999)

Zobecnit výsledky měřených vlastností u jednotlivých druhů dřev je velmi složité, jelikož výsledné fyzikální i mechanické vlastnosti dřeva ovlivňuje velká řada faktorů. O to náročnější je unifikovat charakteristické vlastnosti, když se do výsledků projeví faktor tepelné úpravy, který je sám o sobě komplikovaný proces a konečné vlastnosti

produktu ovlivňuje dalších  $n$  proměnných. Z tohoto důvodu zde budou prezentovány pouze vybrané výsledky určitých procesů.

#### Chemické složky a anatomická struktura

Chemické složky dřeva reagují na tepelné namáhání stejně bez rozdílu druhu dřeviny (viz kapitola 3.3.1.), z toho plyne, že výsledné vlastnosti spíše ovlivňuje jejich zastoupení a anatomická struktura.

#### Fyzikální vlastnosti

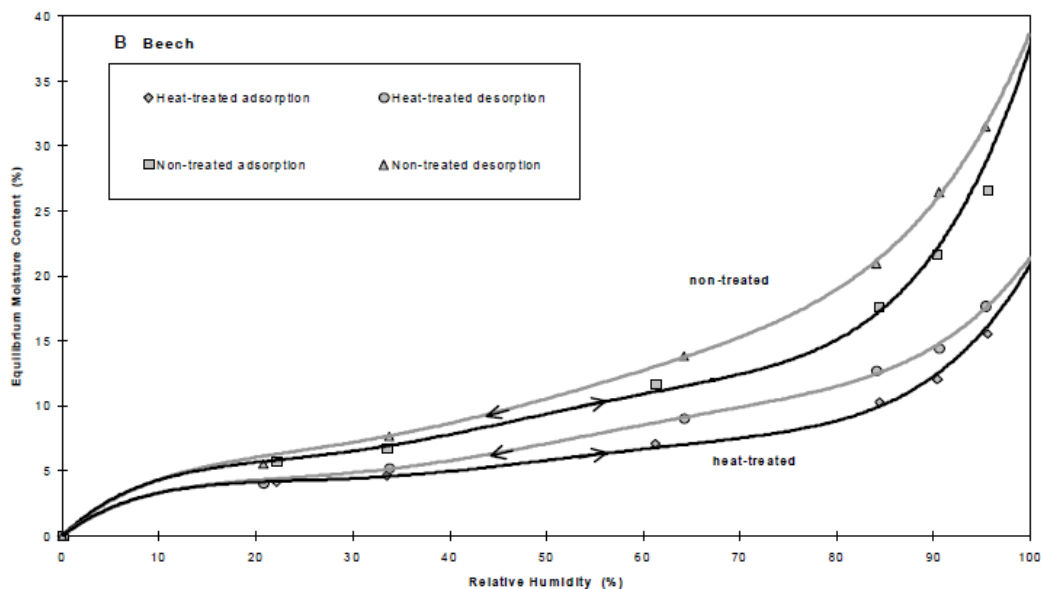
Hmotnostní úbytek u bukového dřeva po tepelné úpravě je běžně mezi 10 až 20 procenty, ale výsledek je ovlivněn mnoha faktory, zejména druhem dřeviny, teplotou modifikace a dobou jejího trvání. (Esteves a Pereira 2009)

Další vlastnosti, u kterých je uváděn pokles je hustota (density) a rovnovážná vlhkost (EMC), jako příklad jsou uvedeny hodnoty v tabulce 4. Hodnoty jsou uvedeny při relativní vlhkosti vzduchu (RH) 65 % a teplotě 20 °C. Obecně lze říci, že RVD je po úpravě významně redukována a mimo podmínek úpravy závisí na její počáteční hodnotě. Pokles se pohybuje v rozmezí 35 až 60 %. Hustota je pak zhruba na 80–90 % původní hodnoty. (Čermák 2013, Kamdem a kol. 2002, Kollmann a Schneider 1963, Tjeerdsma a kol. 1998b)

**Tabulka 4:** Hodnoty objemové hmotnosti (density) a RVD (EMC) pro referenční (control) a ošetřené vzorky (180 °C a 200 °C). (Čermák 2013)

	No. Of samples	Density ( $\rho$ )			EMC (65 % RH, 20 °C)		
		Control	180 °C	200 °C	Control	180 °C	200 °C
Beech	15	807 (20)	715 (17)	695 (13)	10,6 (0,1)	6,8 (0,1)	4,9 (0,1)
Oak	10	640 (54)	701 (20)	n/a (n/a)	12,3 (0,2)	4,7 (0,2)	n/a (n/a)
Poplar	15	422 (18)	407 (31)	362 (18)	10,3 (0,2)	6,6 (0,4)	4,7 (0,2)
Spruce	15	428 (11)	401 (9)	408 (19)	10,7 (0,1)	7,7 (0,2)	6,6 (0,1)

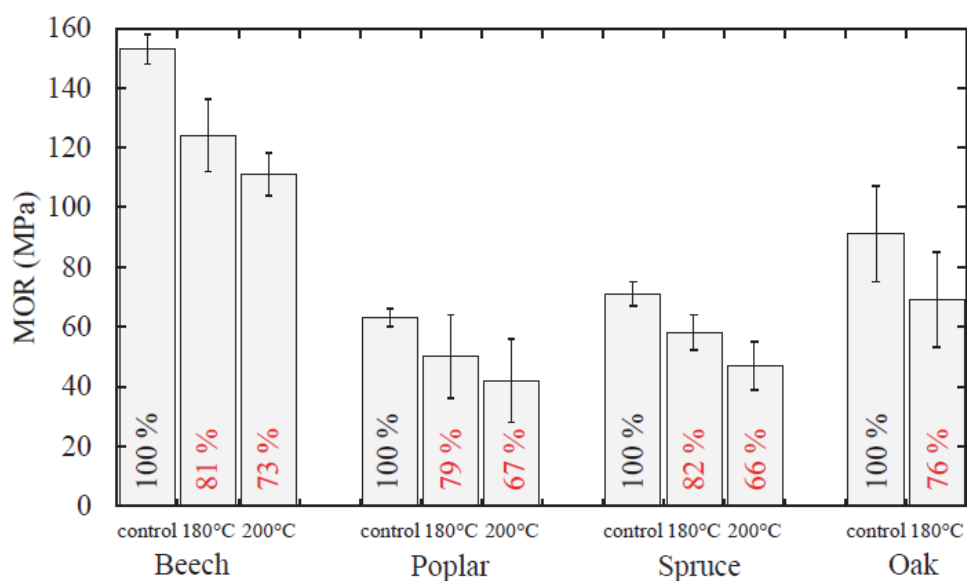
Zvýšení rozměrové stability a odolnost proti biotickým škůdcům úzce souvisí se snížením RVD. Výzkumy ukázaly, že redukce rozměrových změn u buku dosahuje 50 až 80 %. (Burmester 1973, Giebel 1983)



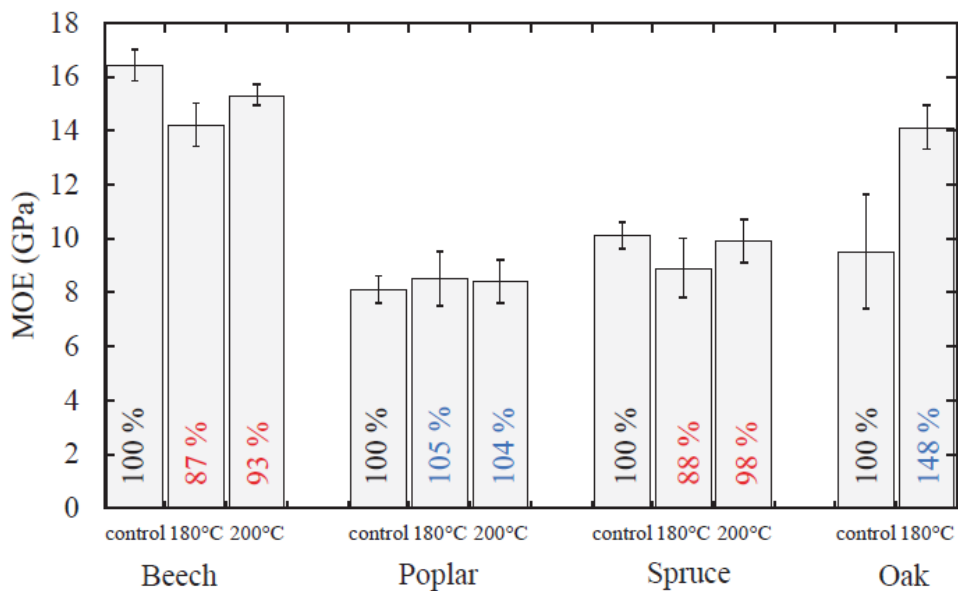
**Obrázek 4:** Sorpčního izoterma pro bukové dřevo neupravené (non – treated) a pro dřevo upravené PLATO procesem (heat – treated). Osa X: Relative Humidity = relativní vlhkost (prostředí); Osa Y: Equilibrium Moisture content = rovnovážná vlhkost (dřevo). (Tjeerdsma a kol. 1999b)

#### Mechanické vlastnosti

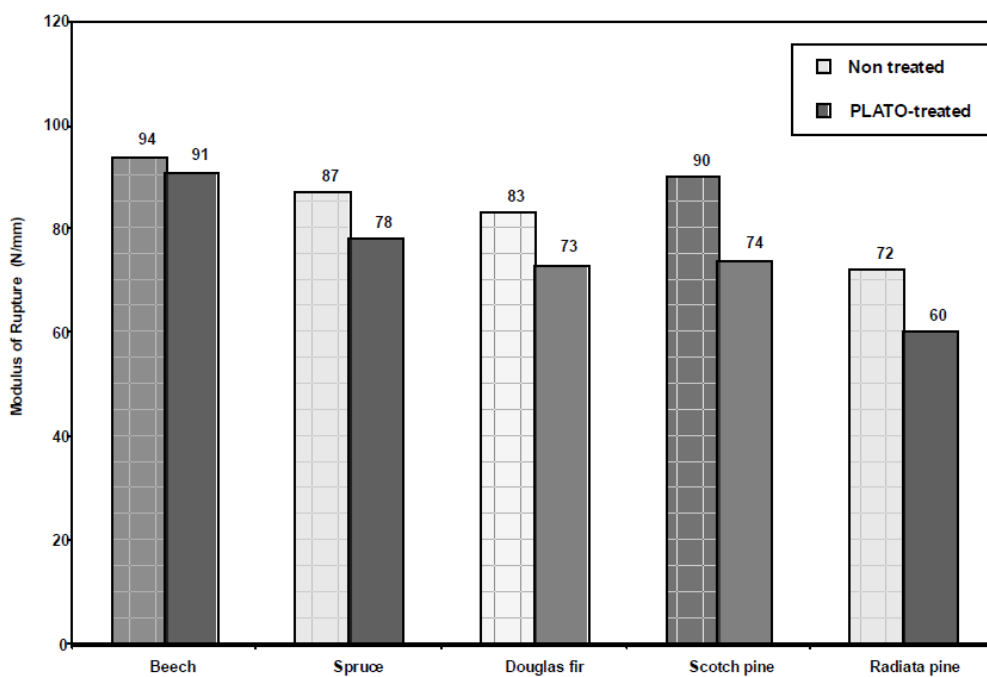
Nejběžněji uváděnou vlastností pro komplexní posouzení pevnosti dřeva je ohybová pevnost, kterou reprezentují hodnoty meze pevnosti (MOR) a modulu pružnosti (MOE). Při porovnání daných hodnot mezi tepelně upraveným a neupraveným bukovým dřevem zjistíme, že v uvedených případech je pokles MOE mezi 10 a 20 procenty a v případě MOR až 40 %. (Čermák 2013, Kamdem 2002)



**Obrázek 5:** MOR (mez pevnosti v ohybu) výsledky tří – bodého ohybu pro referenční (control) a tepelně upravené vzorky (180 °C a 200 °C). Zleva buk, topol, smrk, dub. (Čermák 2013)



Obrázek 6: MOE (modul pružnosti) výsledky tří – bodého ohybu pro referenční (control) a tepelně upravené vzorky (180 °C a 200 °C). (Čermák 2013)



Obrázek 7: Porovnání výsledků MOR tepelně upraveného dřeva metodou PLATO a neupraveného dřeva. Zleva: buk, smrk, douglaska, borovice ztepilá, borovice paprštěná. (Tjeerdsma a kol. 1999b)

## 4 Materiál a metodika

Literární přehled je zaměřen na shromáždění komplexních informací o vysokoteplotní modifikaci dřeva. Informace byly získány z veřejně dostupné literatury, odborných článků a internetových zdrojů. Získané informace byly zpracovány a následně uspořádány do jednotlivých oddílů.

Hlavním záměrem praktické části této práce byla vysokoteplotní modifikace vzorků dřeva tak, aby dopad tepelné úpravy se nejvíce projevil na povrchu materiálu. V důsledku by takto upravené dřevo mělo mít v průřezu nerovnoměrnou tepelnou úpravu, tedy, že směrem od povrchu ke středu průřezu bude projev vysokých teplot na mechanické a fyzikální vlastnosti klesat. Takto upravené dřevo bude podrobena řadě zkoušek, aby se zjistilo, jak se celý proces projevil na výsledné vlastnosti upraveného dřeva. Příprava, tepelné ošetření dřeva a samotné zkoušky probíhaly v laboratořích útěchovského centra, které má ve správě Mendelova univerzita. V komplexu se nachází veškeré potřebné vybavení k realizování tepelné úpravy.

Vlastní zkoušce předcházelo několik zkušebních variant tepelné úpravy, aby bylo možné stanovit vhodné podmínky, postupy a jejich aplikace. Prvotní otázkou bylo, jaký typ tepelné úpravy zvolit. Laboratoře v Útěchově disponují vlastní vysokoteplotní komorovou sušárnou. Předcházející snaha v sušárně tepelně modifikovat vzorky, které budou v průřezu upraveny nerovnoměrně, nebyla dotažena do konce. Problémem se ukázalo, stanovit potřebnou dobu ohřevu a podmínky celého procesu, aby byl zajištěn požadovaný výsledek. Z toho důvodu se hledala alternativní možnost k vysokoteplotní komorové sušárně. Na základě těchto zkušeností, bylo zvoleno hydraulické lisovací zařízení s ohřivanými plochami, které splňovalo požadavky kladené na průběh modifikace. Zvolení kontaktního ohřevu a získané informace ze zkušebních vzorků, vedlo k vytvoření konečné podoby metodiky, tedy teploty a časy úpravy, jaké vlastnosti budou zkoumány, kolik je zapotřebí tělísek apod.

### 4.1 Seznam použitého vybavení

- Hydraulické lisovací zařízení STROZATECH
- Univerzální zkušební zařízení Zwick Z050/TH3A + software TestXpert V11,02
- Spektrofotometr Konica Minolta CM-2600d

- Klimatizační komora Memmert
- Mikrotom Core – microtome
- Kulový mlýn Retsch MM 400
- Laboratorní sušárna
- Laboratorní váhy RADWAG (přesnost 0,001 g)
- Posuvné měřidlo MITUTOYO (přesnost 0,01 mm)
- Spektrofotometr METASH 5100 V

## 4.2 Příprava zkušebních vzorků

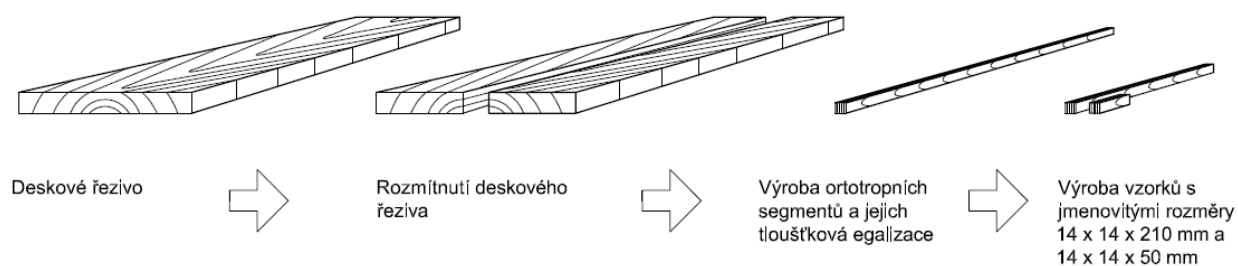
Termické úpravě předcházela výroba potřebného množství vzorků. Vzhledem k destruktivní povaze většiny zkoušek, bylo nutné dobře uvážit jejich množství. Na základě předcházejících testů bylo rozhodnuto, za jakých podmínek bude tepelná úprava provedena, tedy že vzorky budou během vysokoteplotní modifikace vystaveny jedné teplotě, ale dvěma různým dobám. Během tepelného namáhání a při provádění zkoušek bude rozlišen radiální a tangenciální směr vzorků. Mechanické zkoušky byly provedeny po klimatizaci při pokojové teplotě a vlhkosti, která byla později vypočtena za pomoci gravimetrické metody. U referenčních vzorků byla stanovena průměrná RVD 9,11 % a upravené soubory měly průměrnou hodnotu v rozsahu 6,8–7,2 %. Pro možnost vzájemného porovnání budou stejné zkoušky provedeny na potřebném počtu referenčních vzorků (viz tabulka 3).

**Tabulka 5: Počet vzorků a časové intervaly modifikace**

Doba úpravy (min)	Počet vzorků			
	TG směr		RAD směr	
	14 × 14 × 50 [mm]	14 × 14 × 210 [mm]	14 × 14 × 50 [mm]	14 × 14 × 210 [mm]
Referenční	34	30	34	30
15 minut	34	30	34	30
40 minut	34	30	34	30
<b>Celkem</b>	<b>384</b>			

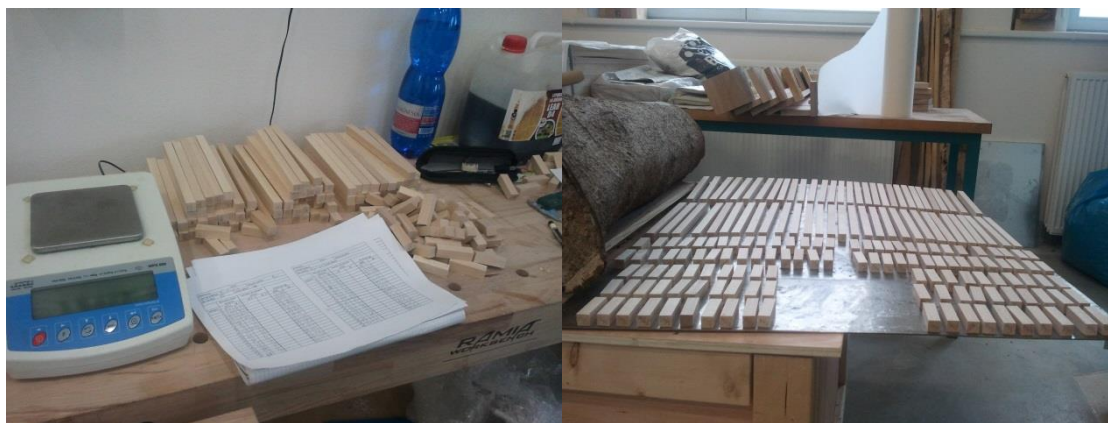
Jednotlivé vzorky byly vyrobeny z deskového bukového řeziva (*Fagus sylvatica L.*). Snaha byla vyrobit co možná nejvíce ortotropní tělíška, aby budoucí výsledky byly co možná nejméně ovlivněny rozdílnými odklony vláken u jednotlivých vzorků. Povolená tolerance odklonu byla 10 stupňů. Každý soubor má vlastní protokol, do kterého byla průběžně zaznamenávána získaná data.

K výrobě vzorků byla využita dílna, která je součástí výzkumného pracoviště v Útěchově. Deskové řezivo bylo rozmítnuto kotoučovou formátovací pilou, ta byla využita i pro výrobu hrubých rozměrů zkušebních tělísek. Čistých rozměrů  $14 \times 14 \times 50$  mm a  $14 \times 14 \times 210$  mm bylo docíleno za pomoci hoblovacího stroje. Odchylka mezi rozměry jednotlivých tělísek by neměla přesáhnout 0,5 mm. Tělíska s viditelnými vadami, které by mohly ovlivnit dosažené výsledky, byly z dalšího postupu vyřazeny. Rozměry vzorků byly přeměřeny digitálním posuvným měřidlem (MITUTOYO), zváženy laboratorními vahami (RADWAG) a označeny pro jejich další identifikaci.



**Obrázek 8:** Schéma výroby potřebných vzorků

Nezvyklé dimenze vzorků vychází z omezení, které je dáno zařízením na postupné odstraňování povrchu (core – mikrotomu). Pro toto zařízení bylo doporučeno redukovat tělíska na co nejmenší rozměry, aby kladený odpor na břit nástroje byl co možná nejmenší a povrch bylo možné lehce odstranit. Zároveň musely být splněny požadavky na rozměry těles pro mechanické zkoušky.



**Obrázek 9:** Příprava vzorků pro tepelnou modifikaci (foto autor)

### 4.3 Rozdělení vzorků do souborů

Vzorky byly ještě před vysokoteplotní úpravou rozděleny a označeny podle směru a doby tepelné úpravy. Zkoušky pro jednotlivé soubory byly rozděleny tak, aby předešlá zkouška neovlivnila výsledek zkoušky následující. Přehled souborů a jemu připadajících zkoušek:

- Soubor 1 obsahuje 4 tělíska z každé varianty vzorků ( $14 \times 14 \times 50$  mm celkem 24 vzorků):
  - Chemická analýza vrstev
- Soubor 2 obsahuje 30 tělísek z každé varianty vzorků ( $14 \times 14 \times 50$  mm celkem 180 vzorků):
  - Tvrdost povrchu
  - Barevný odstín
  - Nasákivost
  - Obsah vlhkosti
- Soubor 3 obsahuje 30 tělísek z každé varianty vzorků ( $14 \times 14 \times 210$  mm celkem 180 vzorků):
  - Ohybová pevnost

### 4.4 Vysokoteplotní modifikace

Jako nejvhodnější metoda tepelného ošetření vzorků byla zvolena metoda jednostranného kontaktního ohřevu. Ohřev pouze jedné strany byl zvolen z důvodu, aby podstoupené zkoušky, zejména chemická analýza vrstev, nebyla ovlivněna ošetřením pronikajícího z protější strany.

Pro naši potřebu bylo využito výhřevné lisovací zařízení STROZATECH, které je k dispozici v útěchovském areálu. Kontaktní hydraulický lis je schopný ohřát každou ze svých lisovacích ploch až na  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ , což je teplota, která je pro tento záměr postačující. Vzhledem k přípravě, která sestavení metodiky předcházela, byly modifikační časy stanoveny na 15 a 40 minut při maximální teplotě  $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vzhledem k tomu, že se nejedná o zařízení určené k tepelné modifikaci, ale o lisovací zařízení, je nutné dbát na to, aby při kontaktu vyhřívané plochy se vzorky nedošlo k jejich slisování. I z tohoto důvodu je kladen důraz na přesné rozměry zkušebních tělísek. Dalším důvodem je



zabránit jejich rozdílnému tepelnému namáhání. Po tepelném ošetření byly vzorky opětovně přeměřeny a zváženy.



**Obrázek 10:** Tělíska uložená v hydraulickém lisu, porovnání upravených (40 min) a neupravených vzorků (foto autor)

## 4.5 Stanovení vlastností

### 4.5.1 Rovnovážná vlhkost dřeva

Nejpřesnější variantou jak stanovit podíl obsažené vlhkosti ve dřevě je použitím gravimetrické (váhové) metody (viz rovnice 1). Podrobný popis metody je uveden v normě ČSN 49 0103.

Rovnice obsahuje tři proměnné, vlhkost, kterou počítáme, hmotnost v absolutně suchém stavu a hmotnost při daných podmínkách prostředí. Hmotnost v absolutně suchém stavu získáme při vysušení vzorků na nulovou vlhkost, ta byla docílena po pětidenním sušení v komorové sušárně, při teplotě  $103 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Podmínky pro stanovení druhé hmotnosti byly zvoleny 65 % vlhkost vzduchu při  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , které byly uměle vytvořeny v klimatizační komoře, zde byly vzorky uloženy 10 dní. Neupravené dřevo za těchto podmínek standardně dosahuje RVD okolo 12 %. K získání potřebných hodnot byly využity připravené tělíska o rozměrech  $14 \times 14 \times 35 \text{ mm}$ , o celkovém množství 150 kusů, které byly rozděleny do pěti souborů podle tabulky 5.

$$w = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

**Rovnice 1:** Stanovení vlhkosti dřeva pomocí gravimetrické metody  
w.....obsažená vlhkost [%]  
m<sub>0</sub>.....hmotnost absolutně suchého dřeva [kg]  
m<sub>1</sub>.....hmotnost při daných podmínkách [kg]

## 4.5.2 Hmotnost a hustota

Vysokoteplotní modifikace je spojena s úbytkem hmotnosti, jak se jednostranný kontaktní ohřev projevil na této charakteristice, byl ověřen za pomoci vzorce 3.

$$m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \text{ [%]}$$

**Rovnice 2:** Výpočet hmotnostního rozdílu  
m.....hmotnostní rozdíl [%]  
m1.....hmotnost před modifikací [g]  
m2.....hmotnost po modifikaci [g]

Kontaktní tepelná modifikace probíhala v hydraulickém lisu, který mohl způsobit, při snaze zajistit co nejlepší kontakt povrchu těles s ohřívanou plochou, že došlo k jejich mírnému stlačení. Díky tomu mohlo dojít ke zvýšení hustoty tělísek oproti neupraveným vzorkům, to mohlo vést k ovlivnění jejich vlastností. Výsledná hustota pravděpodobně bude ovlivněna i změnou hmotnosti a redukováním rozměrů vlivem tepelného ošetření. Z toho důvodu byly tělísky vždy před a po modifikaci přeměřeny a zváženy. Při stanovení hustoty se vycházelo ze vzorce 2. K uvedenému měření byly využity vzorky, které byly použity při zkoušce statické tvrdosti.

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{]}$$

**Rovnice 3:** Výpočet hustoty  
 $\rho$ .....hustota [kg·m<sup>-3</sup>]  
m.....hmotnost [kg]  
V.....objem [m<sup>3</sup>]

## 4.5.3 Nasáklivost

Test nasáklivosti se řídil platnou normou ČSN 49 0104. Oproti normě byly přizpůsobeny rozměry zkušebních vzorků podle základního souboru 14 × 14 × 14 mm, norma udává rozměry 20 × 20 × 10 – 30 mm. Zkouška nasáklivosti proběhla na tělískách ze souboru, který byl určen k měření tvrdosti povrchu. Z toho důvodu byl původní vzorek rozdělen na dvě části a použita byla 14 mm dlouhá část, která nebyla ovlivněna žádnou vadou ani předchozí zkouškou. Redukce rozměrů má význam i z důvodu potlačení rozdílu mezi bobtnáním čel a středem vzorku. Takto upravené vzorky byly máčeny v destilované vodě, při pokojové teplotě, po dobu 240 hodin. Hmotnostní přírůstek byl zaznamenáván průběžně během trvání zkoušky. Stanovení váhového přírůstku bude vyhodnoceno podle Rovnice 1. Zkoušeno bylo celkem 75

vzorků o rozměrech  $14 \times 14 \times 14$  mm, které byly rozděleny do 5 kategorií podle směru a doby ohřevu, jak je uvedeno v tabulce 5.

#### 4.5.4 Chemická analýza vrstev

Chemická analýza má za úkol potvrdit nebo vyvrátit domněnku, že výsledkem uskutečněné vysokoteplotní modifikace bude v průřezu nerovnoměrná tepelná úprava.

K analýze bylo zapotřebí rovnoměrně oddělit vrstvy povrchu, k tomu bylo využito zařízení core - microtome. Byly odebrány celkem čtyři vrstvy, první dvě od povrchu po krocích 0,9 mm a poslední dvě po 1,2 mm. Vzhledem k tomu, že je zařízení schopno odebrat vrstvu silnou jen několik desetin milimetru, muselo se k dosažení požadované tloušťky použít více řezů. Získané vrstvy byly zvlášť rozděleny do uzavíratelných sáčků a přehledně popsány, aby bylo možné identifikovat, o jakou vrstvu jakého souboru se jedná. Analyzováno bylo vždy jedno tělísko z každého souboru.



**Obrázek 11:** Zařízení core - microtome a vzorky odřezaných vrstev (foto autor)

Chemický rozbor vyžadoval, aby z nařezaných vrstev byla vytvořena homogenní směs z důvodu vytvoření extraktu, který bude vycházet z celé vrstvy a ne pouze z její části. Pro tento účel byl využit kulový mlýn Retsch MM 400, který je schopen z nehomogenní směsi vytvořit požadovanou strukturu. Kulový mlýn pracuje na principu vibračního drtiče. Do ocelové schránky je společně s ocelovou kuličkou uzavřen požadovaný materiál, kulička díky silným vibracím o kmitočtu 300 MHz daný materiál rozdrťí. Získaná homogenní směs je připravena k chemické analýze.

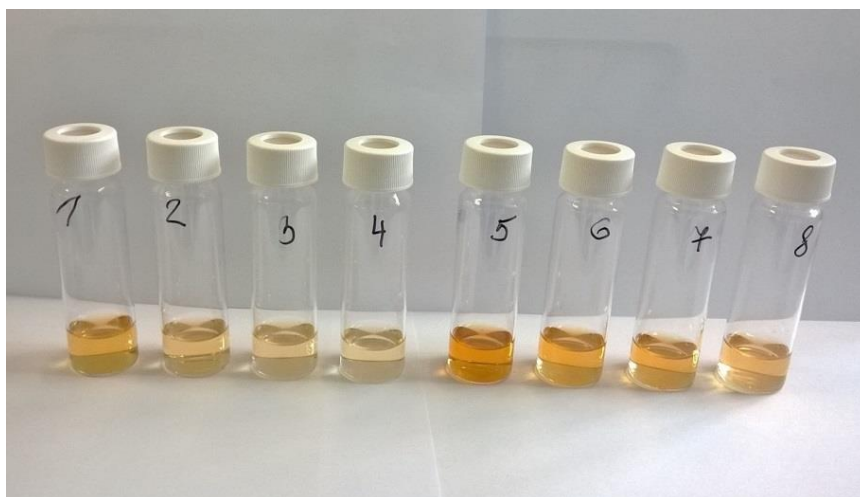


**Obrázek 12:** kulový mlýn a homogenizované vzorky (foto autor)

Chemický rozbor byl proveden metodou spektrofotometrie. Jedná se o způsob stanovení koncentrace určité látky v roztoku na základě pohlcení světla o určité vlnové délce během průchodu danou látkou. Spektrofotometr je zařízení, u kterého je možné nastavit požadovanou vlnovou délku monochromatického světla nebo měřit pouze část absorpčního světla v určitém rozsahu vlnových délek (Kříženecká 2007).

V našem případě byla měřena koncentrace monosacharidových a fenolických složek ve vzorcích, které byly získány z povrchových vrstev zkušebních tělísek. Ke stanovení koncentrací byl použit spektrofotometr METASH 5100 V. Stanovení výše zmíněných látek vypovídá o dopadu tepelného ošetření, jelikož se jedná o produkty degradace složek dřeva během vysokoteplotní modifikace.

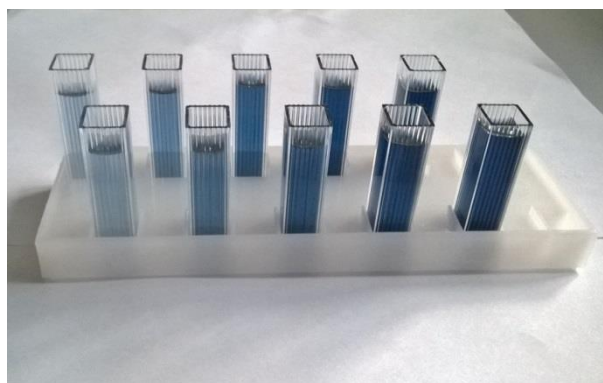
Ke spektrofotometrické analýze je zapotřebí z homogenní dřevní hmoty získat extrakt, ten vznikne přidáním extrakčního činidla (50 % metanol v demineralizované vodě). Takto získaný extrakt byl následně použit pro potřeby spektrofotometrické analýzy.



**Obrázek 13:** Extrakt vzniklý z dřevní hmoty, lze pozorovat pozvolný přechod zbarvení jednotlivých vrstev. Vzorky 1 – 4 pro tepelnou úpravu 15 min, vzorky 5 – 8 pro tepelnou úpravu 40 min (foto Paschová 2016)

Měření celkového obsahu polyfenolických složek bylo provedeno za pomoci Folin – Ciocalteu činidla (FC). Zkouška je založena na kolorimetrické redox reakci polyfenolů s FC činidlem, která vede ke vzniku oxidu molybdenu a podle jeho koncentrace se vzorek zbarví do odstínu modré. Vzorky byly analyzovány spektrofotometricky při vlnové délce 700 nm. Výsledný obsah polyfenolických látek byl vztažen ke kyselině gallové (GA) a to o koncentraci v předpokládaném pracovním rozsahu, výsledky jsou pak prezentovány ve vztahu k ekvivalentu GA.

Stanovení koncentrace sacharidových složek bylo provedeno na základě reakce dřevního extraktu s roztokem fenolu a kyseliny sírové. Vzorky byly analyzovány spektrofotometricky při vlnové délce 490 nm. Obsah sacharidů byl vztažen ke standardu glukózy, která byla stanovena o koncentraci v předpokládaném pracovním rozsahu, výsledky jsou pak prezentovány ve vztahu k ekvivalentu glukózy.



**Obrázek 14:** Vzorky připravené pro spektrofotometrické měření koncentrace sacharidových a fenolických látek (foto Paschová 2016)

Vzhledem k tomu, že nebylo jisté, zda výsledky chemického rozboru budou mít vypovídající hodnoty o tepelné úpravě, byl analyzován vždy pouze jeden reprezentativní vzorek z každého souboru.

#### 4.5.5 Tvrdost

Zkouška statické tvrdosti byla měřena podle metody J. A. Brinella, která spočívá ve vtisku ocelové kuličky o průměru  $D$  silou  $F$  do zkoušeného materiálu. Provedení zkoušky vycházelo z normy ČSN EN ISO 6506-1. Uvedená norma je určena pro obor hutnictví, ale je aplikovatelná i pro zkoušky dřevěných materiálů.

Ke stanovení tvrdosti materiálu bylo použito zařízení Zwick Z050/TH3A, které slouží k testování mechanických vlastností dřeva, toto zařízení spolupracuje se softwarem TestXpert V11,02, který celý průběh zkoušky monitoruje. Zkouška byla provedena za pomoci ocelové kuličky o průměru 6 mm a hloubka vtisku byla zvolena 1,4 mm. Stanovení hloubky vycházelo z podmínky, že hloubka vtisku může být maximálně deseti násobkem tloušťky zkoušeného vzorku, aby výsledek nebyl ovlivněn podložím. Zkoušeno bylo celkem 180 vzorků o rozměrech  $14 \times 14 \times 50$  mm. Test tvrdosti u jednotlivých vzorků probíhal vždy na straně tepelného ošetření. Rozdělení souborů během zkoušky zůstalo zachováno tak, jak je uvedeno v tabulce 5.

Statická tvrdost byla vyhodnocena podle následujícího vzorce:

$$H_b = \frac{2 \cdot F}{\pi D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} [\text{N} \cdot \text{mm}^2]$$

**Rovnice 4:** Statická tvrdost dle Brinella  
 $H_b$ .....Statická tvrdost [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]  
 $F$ .....Síla působící na materiál [N]  
 $D$ .....Průměr kuličky [mm]  
 $d$ .....Průměr otláčené plochy [mm]

Průměr otláčené plochy získáme z rovnice, která vychází z výpočtu Pythagorovy věty:

$$d = 2 \cdot \sqrt{r^2 - (r - h)^2} [\text{mm}]$$

**Rovnice 5:** Průměr otláčené plochy  
 $d$ .....Průměr otláčené plochy [mm]  
 $r$ .....Poloměr kuličky [mm]  
 $h$ .....Výška vtisku kuličky [mm]

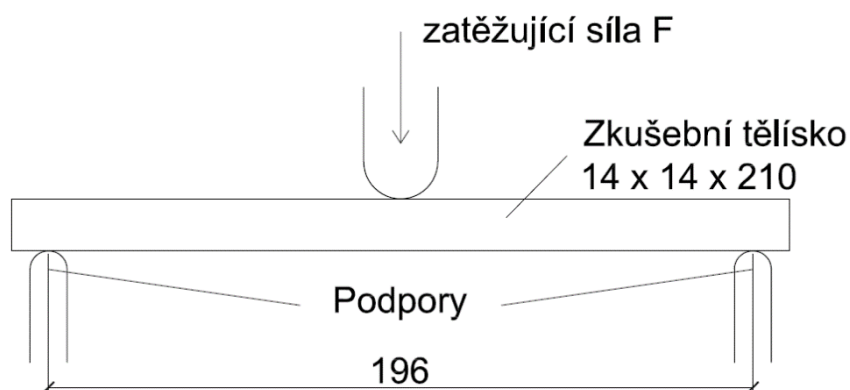


**Obrázek 15:** Univerzální zařízení Zwick, měření tvrdosti (foto autor)

#### 4.5.6 Modul pružnosti a mez pevnosti

Vysoce vypovídající hodnotu o stavu mechanických vlastností má zkouška ohybové pevnosti, která je často uváděna v souvislosti s poklesem mechanických odolností tepelně upraveného dřeva. Ohybová pevnost může být zkoušena jak statickou, tak dynamickou metodou, tato práce se zabývala statickou formou, kterou reprezentuje namáhání tří – bodým ohybem.

Měření ohybové pevnosti bylo provedeno na univerzálním zařízení Zwick, toto zařízení společně s kompatibilním softwarem TestXpert je schopno číselně a graficky zaznamenat průběh celé zkoušky. Software na základě získaných údajů stanoví modul pružnosti (MOE) a mez pevnosti (MOR). Pro zkoušku ohybové pevnosti bylo použito celkem 180 vzorků o rozměrech  $14 \times 14 \times 210$  mm, které byly rozděleny do šesti souborů. Zkouška probíhala tak, že tepelně ošetřená strana byla namáhána na tlak, tedy ohybová síla působila na ošetřený povrch. Rozpon podpěr a rozměry těles, vycházely z britských standardů BS 373-1957, kde lze najít přepočty pro atypické rozměry vzorků (depth:span – 1 : 14). Vzorce pro výpočet výsledných hodnot ohybové pevnosti (MOE, MOR) jsou uvedeny v téže normě. Dané vzorce jsou v programu TestXpert již předdefinovány, ten na základě průběhu zkoušky potřebné hodnoty automaticky vypočte.



**Obrázek 16:** Schéma a důležité parametry ohybového namáhání

## 4.6 Barevné změny

Barevné změny povrchu vyvolané tepelným ošetřením byly vyhodnoceny spektrofotometrem Konica Minolta CM – 2600d. Zařízení je schopno změřit parametry barevného spektra, na základě množství odraženého světla od měřeného povrchu. Výsledkem spektrofotometrického měření je číselné určení souřadnic v rovnoměrné kolorimetrické soustavě  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$ , kde  $L^*$  reprezentuje složku měrného světla (100 bílá, 0 černá),  $a^*$  chromatická složka (od zelené do červené) a  $b^*$  chromatická složka (od modré do žluté). Rozdíl mezi barvami lze číselně vyjádřit pomocí  $\Delta E$ , která je vyjádřena následující rovnicí.

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

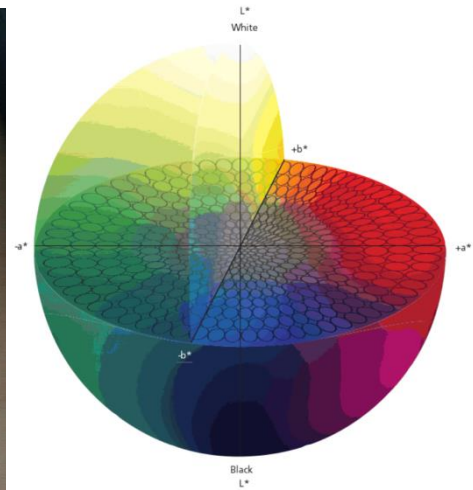
**Rovnice 6:** Odchyla barevného spektra  
 $\Delta E$ .....číselný rozdíl v barvě  
 $L^*$ .....rozdíl mezi původní hodnotou  $L^*$  a aktuální  $L^*$   
 $a^*$ .....rozdíl mezi původní hodnotou  $a^*$  a aktuální  $a^*$   
 $b^*$ .....rozdíl mezi původní hodnotou  $b^*$  a aktuální  $b^*$

Hodnocení barevné změny:

- $\Delta E$ : 0,0 až 0,2 změna není viditelná
- $\Delta E$ : 0,2 až 1,0 velmi malá změna
- $\Delta E$ : 1,0 až 3,0 malá změna
- $\Delta E$ : 3,0 až 6,0 střední změna
- $\Delta E$ : 6,0 a více značná změna

Vyhodnocení změn barevného spektra povrchu bylo provedeno na základě aritmetických průměrů jednotlivých souborů, které byly stanoveny z deseti reprezentačních vzorků každého souboru. Výsledky pak byly vzájemně porovnány.





**Obrázek 17:** Spektrofotometr - měření barevného odstínu povrchu vzorků (foto autor)  
**Obrázek 18:** Rovnoměrná kolorimetrická soustava CIELAB (Gundlach ©2015)

## 4.7 Interpretace výsledků

Jednotlivé soubory budou podrobeny Shapiro – Wilk testu, za účelem určení normality rozložení obsažených dat. Obecně platí, že čím více se hodnota testované statistiky  $W$  blíží jedné, tím je rozložení hodnot v souboru normálnější. K určení přechodu mezi normálním a nenormálním rozložením získaných dat slouží tabelová tzv. kritická hodnota, která tuto hranici definuje na základě počtu měření v souboru a hladině významnosti (v našem případě 0,05).

Po zjištění normality dat následuje Grubbsův test, který má za úkol odstranění extrémních hodnot, které s velkou pravděpodobností byly způsobeny chybou a ovlivňují další výsledky. Extrémní hodnoty souboru jsou vyhodnoceny za pomoci Grubbsova testu a pokud se na základě srovnání s tabelovou kritickou hodnotou projeví, že se jedná o chybnou hodnotu, jsou ze souboru odstraněny. V tomto případě kritická hodnota vychází z počtu měření a z tzv. úrovně důvěry (v našem případě 0,95). Hodnoty jednotlivých souborů, které budou redukovány o extrémní hodnoty, budou následně zobrazeny ve formě krabicových grafů.

Na základě výsledků jednofaktorové analýzy ANOVA můžeme identifikovat, zda odchylky středních hodnot mezi jednotlivými soubory lze považovat za staticky významné. Analýzou se stanoví  $p$  hodnota, která se porovnává s hladinou významnosti  $\alpha$ , v našem případě charakterizována hodnotou 0,05. Výsledek analýzy může nabýt dvou stavů, tedy  $p \geq \alpha$ , v tomto případě hovoříme o potvrzení nulové hypotézy, tj. pozorované rozdíly nejsou statisticky významné, a  $p < \alpha$ , výsledkem je zamítnutí

nulové hypotézy = rozdíly jsou statisticky významné a je potřeba provést test, který určí soubory mezi, kterými jsou významné rozdíly.

Tukey - Kramerův test porovnává soubory vzájemně mezi sebou a definuje ty soubory, mezi kterými existuje statisticky významný rozdíl. Hladina spolehlivosti je opět zvolena  $\alpha = 0,05$ , podle které, společně s počtem měření, je stanovena kritická hodnota  $Q$ .

Zkoušky, které obsahovaly velké množství získaných dat, budou z důvodu přehlednosti prezentovány za pomoci prvků statistické analýzy, průměr, medián, minimum, maximum, směrodatná odchylka a variační koeficient. Zpracované hodnoty pak budou v práci zobrazeny v tabulkové podobě (viz tabulka 6). Důležitá data a případné závislosti mezi veličinami budou interpretovány ve formě grafického výstupu. Každá kategorie zkoušek bude obsahovat i slovní shrnutí získaných výsledků statistické analýzy.

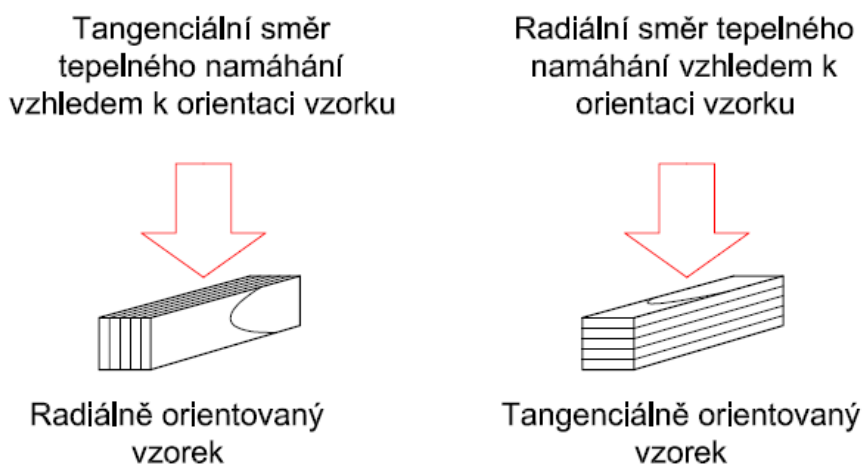
Vzhledem k atypické kontaktní modifikaci bude pro vyhodnocení získaných výsledků stěžejní vzájemné porovnávání mezi jednotlivými soubory, které se mezi sebou odlišovaly různou dobou úpravy a směrem tepelného namáhání. Stejně tak budou výsledky vztaženy i k hodnotám, které byly získány pro neupravené tzv. referenční soubory, které budou shodně namáhány v různých směrech. Porovnání získaných hodnot s výsledky jiných procesů tepelné modifikace je složité, jelikož výsledné vlastnosti dřeva jsou podmínkami úpravy značně ovlivněny. Z toho důvodu takové srovnání bude probíhat spíše v obecné hladině, tedy jaký má tepelná úprava vliv na konkrétní vlastnosti a zda bylo dosaženo podobných výsledků (trendů), které uvádějí jiní autoři. Podobný proces tepelné úpravy, se kterým by mohly být získané hodnoty porovnány, se nepodařilo dohledat.

Statistické veličiny jednotlivých zkoušek jsou v kapitole výsledky zobrazeny za pomoci tabulek. Vzhled tabulky a stručný popis jednotlivých statistických veličin je uveden v tabulce 6.

**Tabulka 6: Vzhled tabulek zobrazující statistické veličiny**

Statistická veličina	POPIS	
	DRUH ZATÍŽENÍ	DRUH ZATÍŽENÍ
	DOBA PŮSOBENÍ ZATÍŽENÍ	DOBA PŮSOBENÍ ZATÍŽENÍ
Počet vzorků	Uvádí konečný počet vzorků, po vyřazení extrémních hodnot pomocí Grubbsova testu	
Aritmetický průměr	Střední hodnota souboru	
Medián	Hodnota, která rozděluje vzestupně seřazený soubor na dvě stejné poloviny	
Minimum	Nejnižší naměřená hodnota souboru	
Maximum	Nejvyšší naměřená hodnota souboru	
Směrodatná odchylka	Kvadratický průměr odchylek hodnot souboru od jejich aritmetického průměru	
Variační koeficient [%]	Procentuální vyjádření směrodatné odchylky	

Interpretace zjištěných výsledků je v práci uváděno výhradně v podobě, která odkazuje na směr působení tepelného média (tangenciální, radiální), jak je uvedeno na obrázku 21, nikoliv na orientaci samotného vzorku během zkoušky.



**Obrázek 19: Směr působení tepelné modifikace podle orientace vzorků**

## 5 Výsledky

### 5.1 Rovnovážná vlhkost dřeva

Výsledky Shapiro – Wilkova testu normality rozdělení hodnot v souboru, byly větší než kritická hodnota pro hladinu spolehlivosti  $\alpha = 0,05$ , z toho důvodu můžeme konstatovat, že zkoumané soubory mají normální rozdělení. V závislosti na této skutečnosti byl proveden Grubbsův test extrémních hodnot, na základě kterého byly, po srovnání s kritickou hodnotou, tři soubory z pěti redukovány o nejnižší hodnoty. Konkrétně u souborů tepelně namáhaných v tangenciálním směru a 40 minut v radiálním směru (zvýrazněno červeně v tabulce 7). Následně byly analyzovány statisticky významné rozdíly mezi jednotlivými soubory, k tomu byl využit test ANOVA. U obou skupin test vyhodnotil, že jejich soubory jsou statisticky významně odlišné, jelikož jejich p hodnota je nižší než kritická hodnota 0,05. Pro získání přehledu, které ze souborů se navzájem statisticky liší, byl proveden Tukey – Kramerův test. Ten potvrdil významné odchylky mezi všemi soubory, které byly tepelně ošetřeny v tangenciálním směru i vůči referenčnímu souboru. U radiálně namáhaných souborů test potvrdil významné rozdíly mezi ošetřenými soubory a referenčním souborem, ale vzájemnou odlišnost u ošetřených souborů nepotvrdil. Shrnutí výsledků testů statistické analýzy zachycuje tabulka 7.

Krabicový graf (obrázek 20) znázorňuje prostřednictvím čtverce spodní 25% a horní 75% kvartil, čára uvnitř čtverce interpretuje polohu mediánu v souboru a chybové úsečky rozpětí neodlehklých hodnot. Graf je zobrazen po redukci extrémních hodnot souborů.

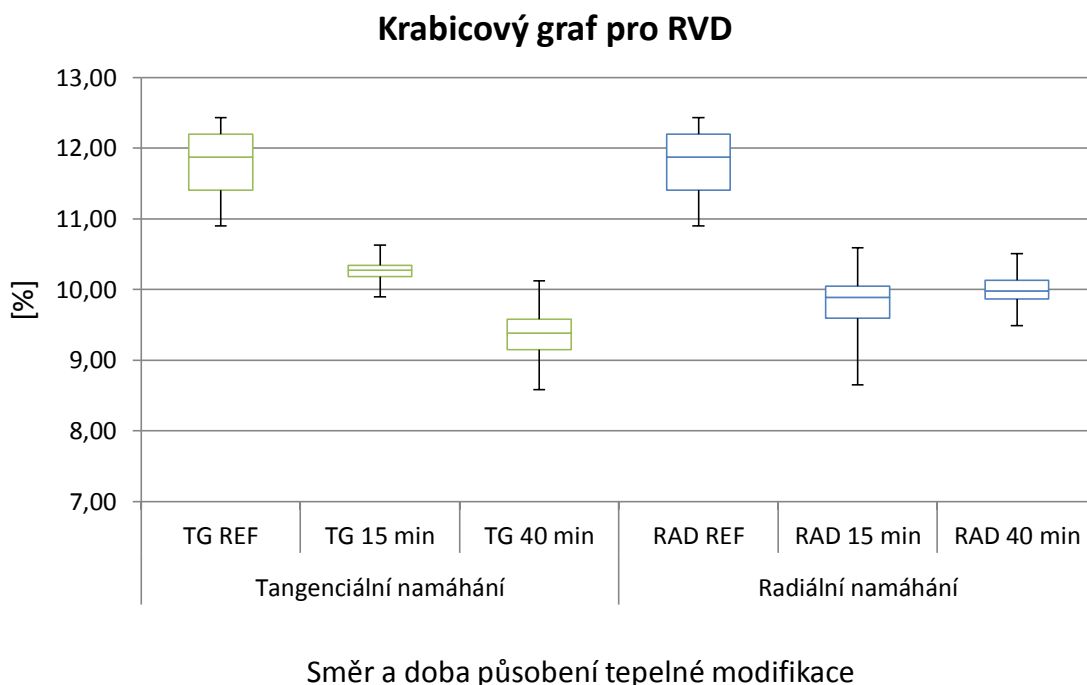
Průměrné hodnoty obsažené vlhkosti po klimatizaci vzorků v ustálených podmínkách zobrazuje graf na obrázku 21. Přičemž statisticky významně rozdílné byly vyhodnoceny všechny soubory tangenciálního namáhání a v případě radiálně upravených souborů pak rozdíly mezi referenčním a upravenými soubory.

**Tabulka 7: Výsledky testů statistické analýzy pro rovnovážnou vlhkost**

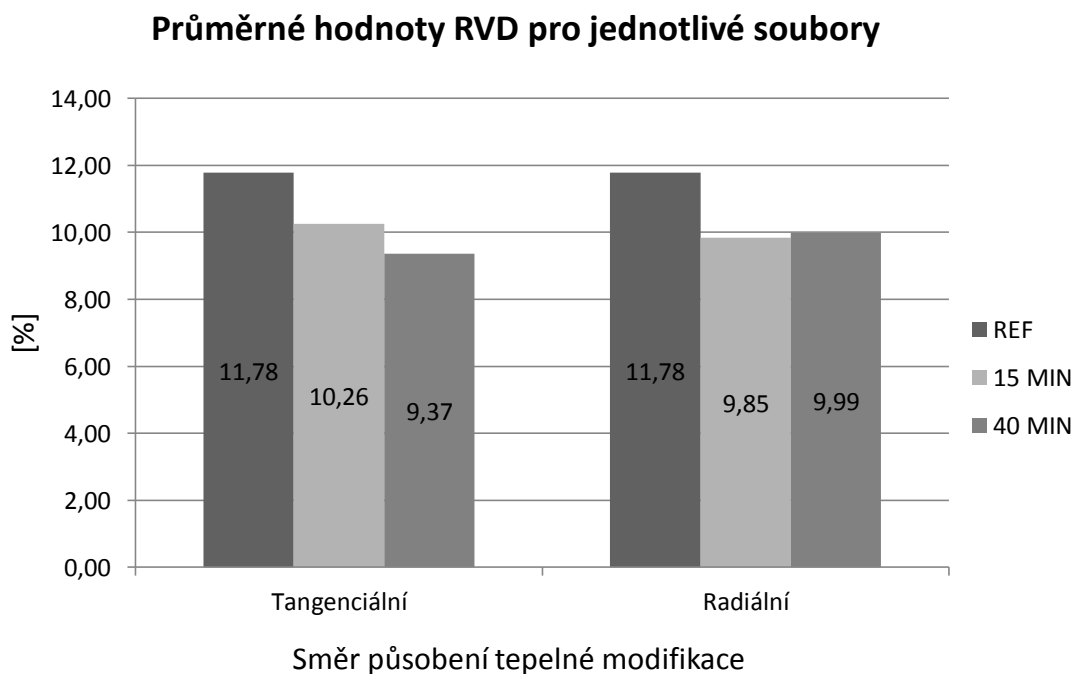
	Přehled výsledků testů statistické analýzy					
	Modifikováno v TG směru			Modifikováno v RD směru		
	REF	15 MIN	40 MIN	REF	15 MIN	40 MIN
Shapiro - Wilk	0,929	0,932	0,938	0,929	0,952	0,928
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )	0,927					
Grubbs MIN	1,901	3,594	3,210	1,901	2,625	3,167
Grubbs MAX	1,404	1,790	1,788	1,404	1,626	1,561
Úroveň spolehlivosti = 95 %	2,745					
ANOVA	0,000			0,0000		
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )	0,050					
Tukey - Kramer	Statisticky významné rozdíly mezi soubory					
REF / 15 MIN	1,551		1,937			
15 MIN / 40 MIN	0,913		0,055			
REF / 40 MIN	2,465		1,882			
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )	0,146			0,162		

**Tabulka 8: Hodnoty statistických veličin pro obsah vlhkosti**

Statistická veličina	OBSAH VLHKOSTI [%]				
	Modifikováno v TG směru		Modifikováno v RD směru		REF
	15 MIN	40 MIN	15 MIN	40 MIN	
Počet vzorků	29	29	30	28	30
Aritmetický průměr	10,23	9,32	9,85	9,9	11,78
Medián	10,21	8,66	9,95	10,14	10,92
Minimum	9,44	7,87	8,65	8,68	10,9
Maximum	10,63	10,12	10,59	10,5	12,44
Směrodatná odchylka	0,22	0,46	0,46	0,39	0,47
Variační koeficient [%]	2,2	4,92	4,72	3,97	4,02



**Obrázek 20:** Krabicový graf pro hodnoty rovnovážné vlhkosti dřeva



**Obrázek 21:** Průměrné hodnoty relativní vlhkosti dřeva pro jednotlivé soubory

## 5.2 Hmotnost

Statistická analýza byla provedena pro rozdíly naměřených hmotností mezi soubory před a po úpravě, aby bylo možné, ze statistického pohledu říci, jaký je mezi nimi vztah.

Shapiro – Wilkův test potvrdil normalitu rozložení naměřených dat. Soubory byly dále analyzovány Grubbsovým testem extrémních hodnot, ten rozpoznal možnou naměřenou chybu u 15 minut tangenciálně namáhaných a 40 minut radiálně namáhaných vzorků. Na základě testu byly tyto soubory redukovány o nejvyšší, respektive nejnižší naměřenou hodnotu. Testem ANOVA bylo pro tuto skupinu souborů vyhodnoceno, že jejich střední hodnoty jsou mezi sebou statisticky významně rozdílné. Tukey – Kramerův test ukázal, že odchylky mezi soubory jsou statisticky významné ve všech případech, mimo souborů, které byly shodně tepelně namáhány 40 minut. Shrnutí výsledků testů statistické analýzy zachycuje tabulka 9.

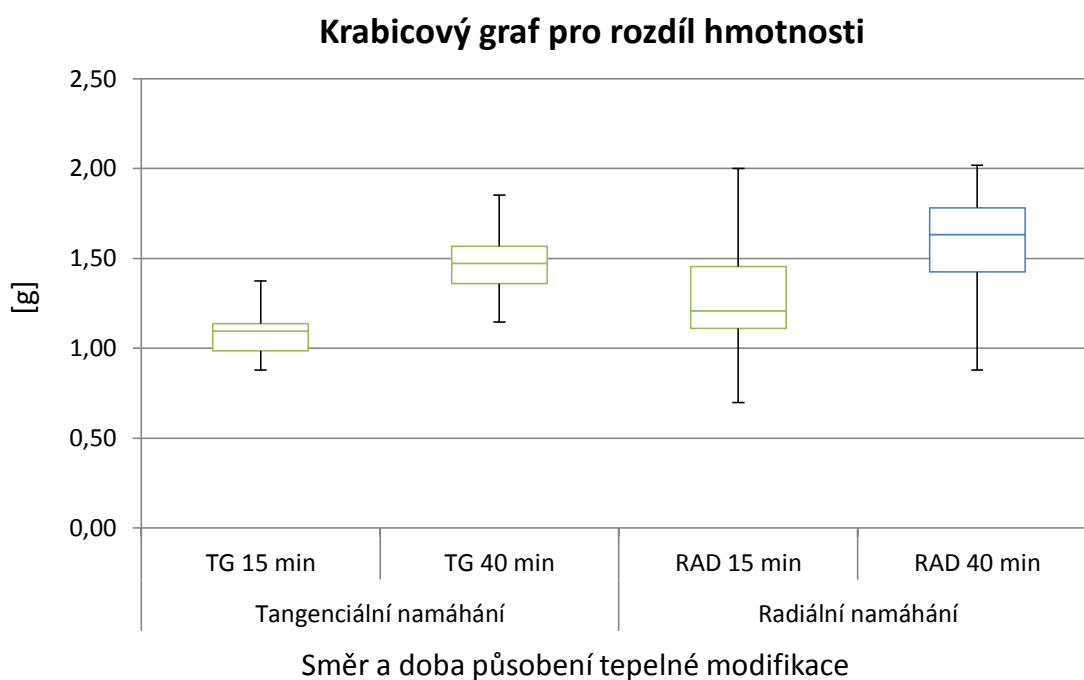
Naměřená hmotnost byla po tepelném ošetření vždy nižší než před modifikací, jak je patrné z grafu hmotností pro jednotlivé soubory na obrázku 23, který zobrazuje průměrnou váhu vzorků před a po modifikaci.

**Tabulka 9: Výsledky testů statistické analýzy pro rovnovážnou vlhkost**

	Přehled výsledků testů statistické analýzy			
	Modifikované vzorky			
	TG15	TG40	RD15	RD40
Shapiro - Wilk	0,959	0,929	0,980	0,932
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )	0,927			
Grubbs MIN	1,598	1,552	2,264	<b>2,780</b>
Grubbs MAX	<b>2,874</b>	2,639	2,297	1,441
Úroveň spolehlivosti = 95 %	2,745			
ANOVA	<b>0,000</b>			
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )	0,050			
Tukey - Kramer	Statisticky významné rozdíly mezi soubory			
TG15 / TG40	<b>0,425</b>			
TG15 / RAD15	<b>0,188</b>			
TG15 / RAD40	<b>0,454</b>			
TG40 / RAD15	<b>0,237</b>			
TG40 / RAD40	0,029			
RAD15 / RAD40	<b>0,266</b>			
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )	0,086			

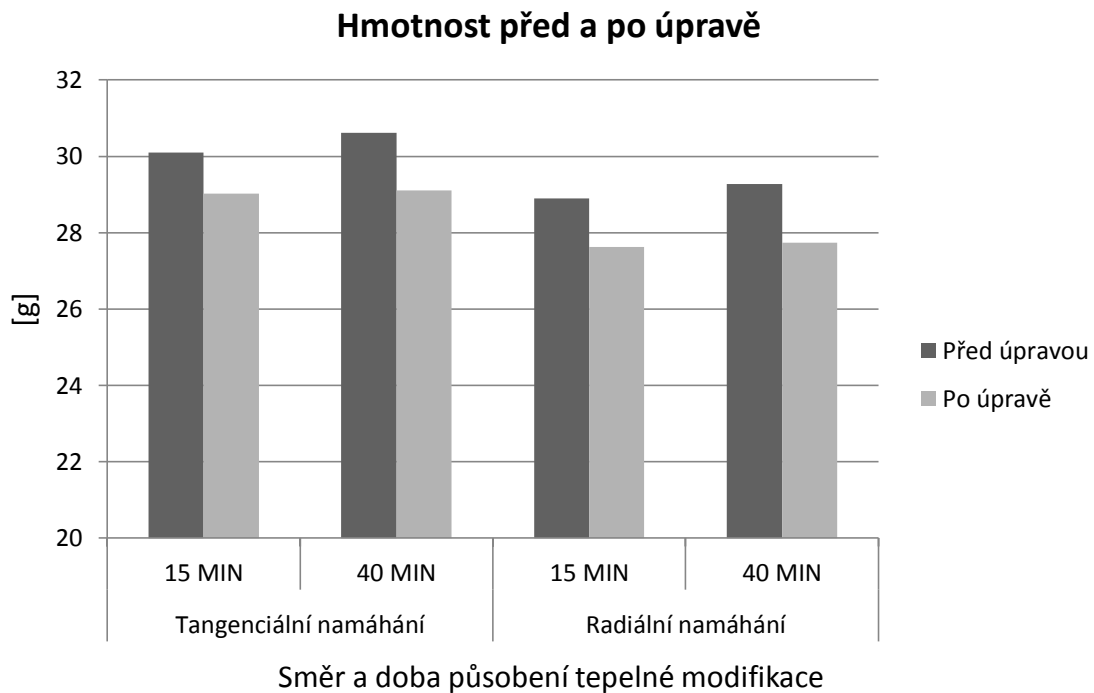
**Tabulka 10: Hodnoty statistických veličin naměřených hmotností před a po úpravě**

Statistická veličina	Hmotnost [g]							
	Modifikováno v TG směru				Modifikováno v RD směru			
	15 minut		40 minut		15 minut		40 minut	
	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po
Počet vzorků	29	29	30	30	30	30	29	29
Aritmetický průměr	30,11	29,02	30,62	29,10	28,90	27,62	29,28	27,74
Medián	30,32	29,22	30,55	29,05	28,79	27,44	29,11	27,65
Minimum	27,91	26,85	27,73	26,53	26,88	25,54	27,99	26,58
Maximum	32,75	31,63	32,81	31,23	30,54	29,85	30,26	29,11
Směrodatná odchylka	1,36	1,31	1,14	1,09	0,86	0,93	0,55	0,57
Variační koeficient [%]	4,53	4,50	3,72	3,73	2,99	3,35	1,89	2,05



**Obrázek 22: Krabicový graf pro rozdíly hmotností před a po tepelné úpravě**





**Obrázek 23:** Průměrná hmotnost před úpravou a po úpravě

### 5.3 Hustota

Statistickou analýzou byly testovány rozdíly hustot, které byly naměřeny v rámci souboru před a po tepelné modifikaci. Aplikovaný test normality zhodnotil, že rozložení prvků, které jsou obsaženy v jednotlivých souborech, lze na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ , považovat za normální. Na základě Grubbsova testu byla z tangenciálně namáhaného souboru, který byl tepelně upravován 15 minut, odstraněna maximální hodnota. Test ANOVA zamítl nulovou hypotézu o shodě středních hodnot mezi soubory, proto skupina souborů byla podrobena Tukey – Kramerovým testem, který vyhodnotil shodu mezi soubory, které byly tepelně modifikovány po dobu 15 minut. Shrnutí výsledků testů statistické analýzy zachycuje tabulka 11.

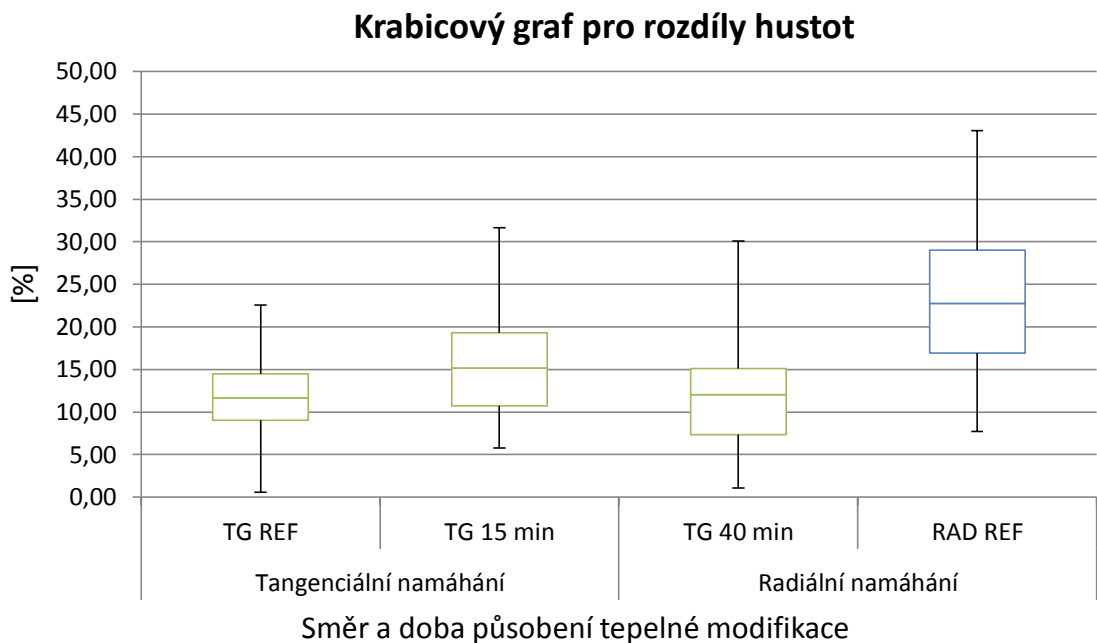
Stejně jako u hmotnosti i hustota měřených vzorků po úpravě u všech souborů klesla, tuto skutečnost dokládá sloupcový graf na obrázku 25, který zobrazuje hodnoty průměrných hustot vždy pro každý měřený soubor zvlášť.

**Tabulka 11: Výsledky testů statistické analýzy pro rovnovážnou vlhkost**

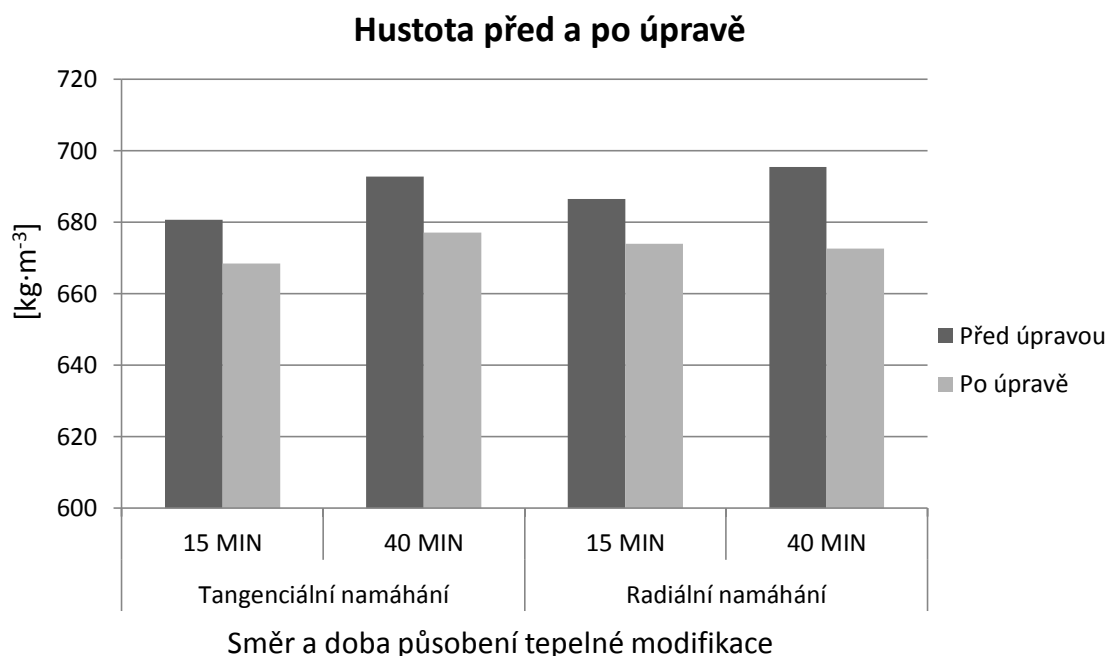
	Přehled výsledků testů statistické analýzy			
	Modifikované vzorky			
	TG15	TG40	RD15	RD40
Shapiro - Wilk	0,949	0,951	0,929	0,981
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )	0,927			
Grubbs MIN	2,087	1,597	1,715	1,819
Grubbs MAX	3,279	2,569	2,595	2,412
Úroveň spolehlivosti = 95 %	2,745			
ANOVA	0,000			
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )	0,050			
Tukey - Kramer	Statisticky významné rozdíly mezi soubory			
TG15 / TG40	3,324			
TG15 / RAD15	0,262			
TG15 / RAD40	10,550			
TG40 / RAD15	3,063			
TG40 / RAD40	7,226			
RAD15 / RAD40	10,289			
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )	2,375			

**Tabulka 12: Hodnoty statistických veličin pro hustoty před a po úpravě**

Statistická veličina	Hmotnost [g]							
	Modifikováno v TG směru				Modifikováno v RD směru			
	15 minut		40 minut		15 minut		40 minut	
	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po
Počet vzorků	29	29	30	30	30	30	30	30
Aritmetický průměr	680,70	668,34	692,69	677,01	686,50	673,88	695,47	672,56
Medián	683,99	675,32	691,16	673,93	688,75	672,22	692,62	669,14
Minimum	632,57	621,75	634,16	623,48	635,64	623,12	668,19	645,78
Maximum	747,41	732,93	749,94	738,09	723,93	722,84	717,24	700,69
Směrodatná odchylka	29,49	29,24	26,27	26,71	21,67	22,21	13,49	13,23
Variační koeficient [%]	4,33	4,37	3,79	3,94	3,16	3,30	1,94	1,97



**Obrázek 24:** Krabicový graf pro rozdíl hustot před a po úpravě



**Obrázek 25:** Průměrná hustota před úpravou a po úpravě

## 5.4 Nasáklivost

Statickou analýzou se zkoumaly rozdíly naměřených hmotností před a po máčení, jejichž účelem bylo definovat statisticky významné odchylky středních hodnot mezi

soubory. Rozložení hodnot v souborech bylo prohlášeno za normální na základě Shapiro – Wilkova testu. Hodnoty, které by mohly být prohlášeny za chybné, nebyly zjištěny u žádného souboru. Odchytky mezi soubory byly za pomoci testu ANOVA posouzeny jako statisticky významné, proto analýza pokračovala Tukey – Kramerovým testem, který porovnává odchytky mezi soubory. Výsledky všech testů jsou shrnuty v tabulce 13.

Graf, který zachycuje průměrné hodnoty jednotlivých souborů před a po máčení vzorků, interpretuje obrázek 27. Hmotnost vysušených vzorků před začátkem testu nasáklivosti vykazovala mezi jednotlivými soubory jen malé rozdíly, po jeho skončení však soubory, které byly namáhány tangenciálně, vykazovaly vyšší příjem kapaliny.

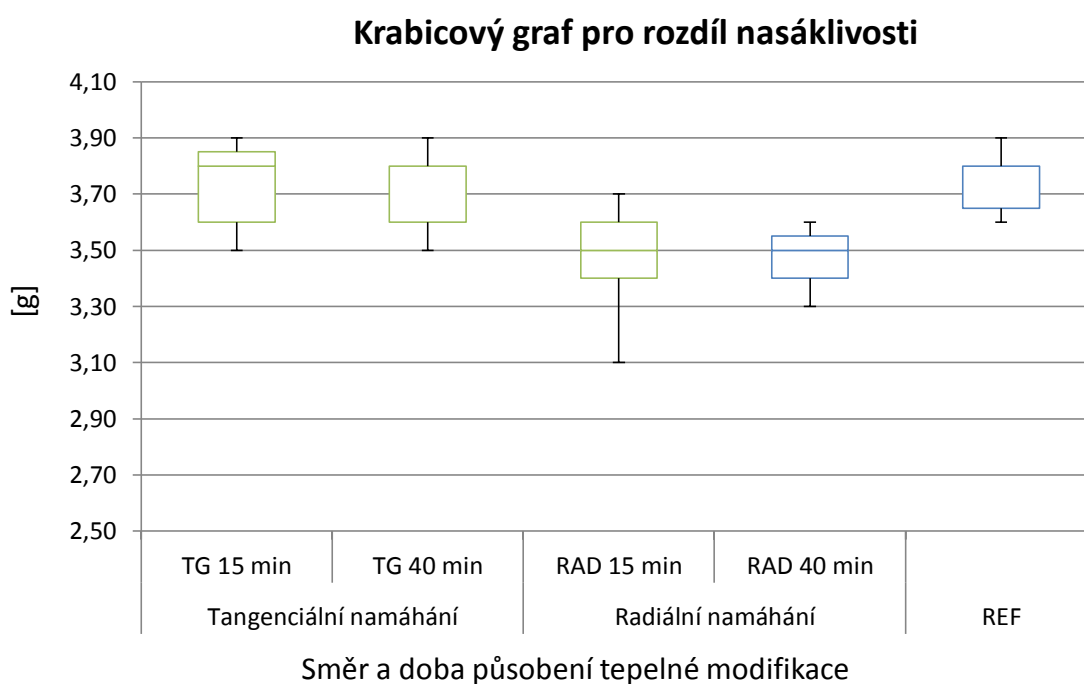
Grafické znázornění průběhu nasáklivosti v čase zobrazuje obrázek 28. Poměrně prudký nárůst přechází do fáze pozvolných přírůstků. Z grafu je patrné, že během prvních měření došlo k rozdílu mezi tangenciálně namáhanými a zbylými soubory.

**Tabulka 13: Výsledky testů statistické analýzy pro nasáklivost**

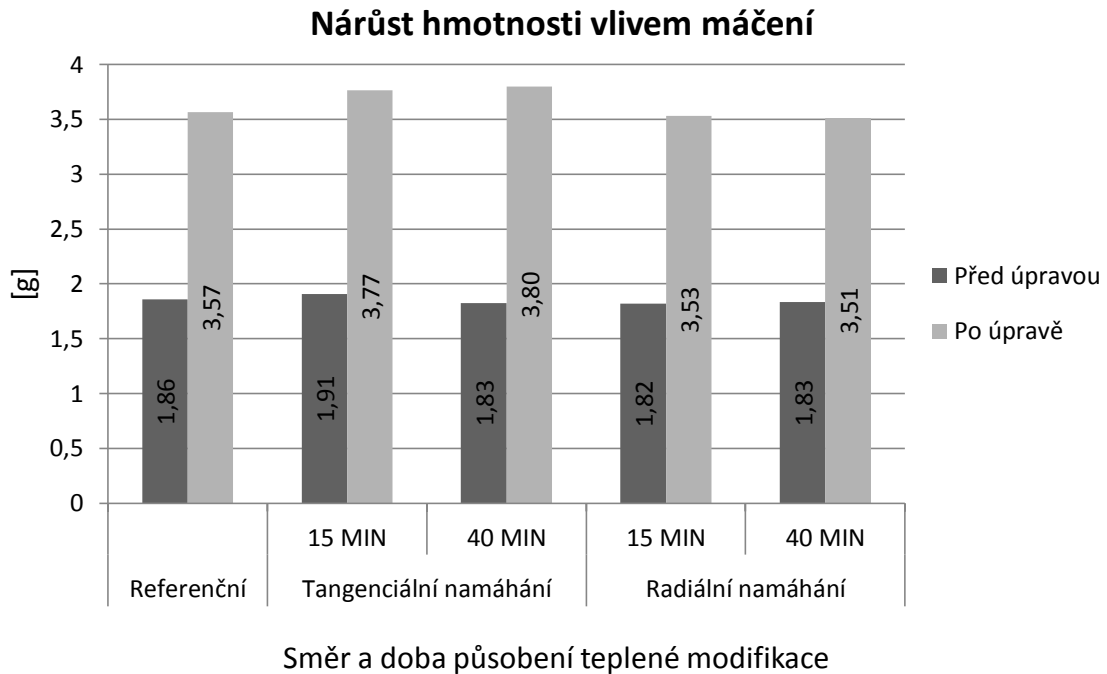
	Přehled výsledků testů statistické analýzy				
	Modifikované vzorky				REF
	TG15	TG40	RD15	RD40	
Shapiro - Wilk	0,887	0,882	0,891	0,887	0,888
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )			0,881		
Grubbs MIN	1,869	2,034	2,152	1,502	1,396
Grubbs MAX	1,246	1,356	1,246	1,315	1,596
Úroveň spolehlivosti = 95 %			3,082		
ANOVA			0,0000		
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )			0,050		
Tukey - Kramer	Statisticky významné rozdíly mezi soubory				
TG15 / TG40			0,000		
TG15 / RAD15			0,260		
TG15 / RAD40			3,460		
TG15 / REF			0,000		
TG40 / RAD15			0,260		
TG40 / RAD40			0,280		
TG40 / REF			0,000		
RAD15 / RAD40			0,020		
RAD15 / REF			0,260		
RAD40 / REF			0,280		
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )			0,062		

**Tabulka 14: Hodnoty statistických veličin pro nasáklivost před a po zkoušce**

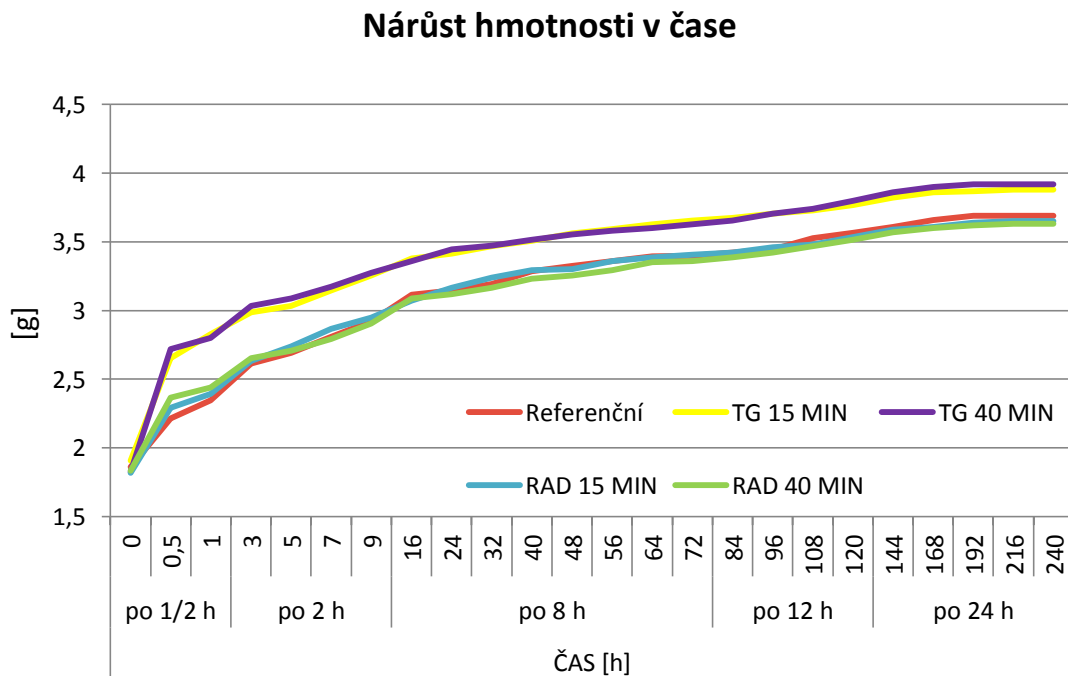
Statistická veličina	Hmotnost [g]									
	Tangenciální namáhání				Radiální namáhání				REF	
	15 minut		40 minut		15 minut		40 minut		Před	Po
	Před	Po	Před	Po	Před	Po	Před	Po		
Aritmetický průměr	1,9	3,9	1,8	3,9	1,8	3,7	1,8	3,6	1,9	3,7
Medián	2,0	3,9	1,8	4,0	1,8	3,7	1,8	3,6	1,9	3,7
Minimum	1,8	3,6	1,7	3,7	1,7	3,3	1,7	3,4	1,7	3,5
Maximum	2,2	4,1	1,9	4,1	1,9	3,9	2,0	3,9	2,0	3,9
Směrodatná odchylka	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Variační koeficient [%]	10,5	3,7	3,1	3,4	4,6	5,1	4,3	3,8	4,3	2,9



**Obrázek 26: Krabicový graf pro rozdíl nasáklivosti před a po máčení**



**Obrázek 27:** Průměrné hodnoty hmotností naměřené před a po testu nasáklivosti



**Obrázek 28:** Nárůst průměrné hmotnosti souborů v závislosti na čase

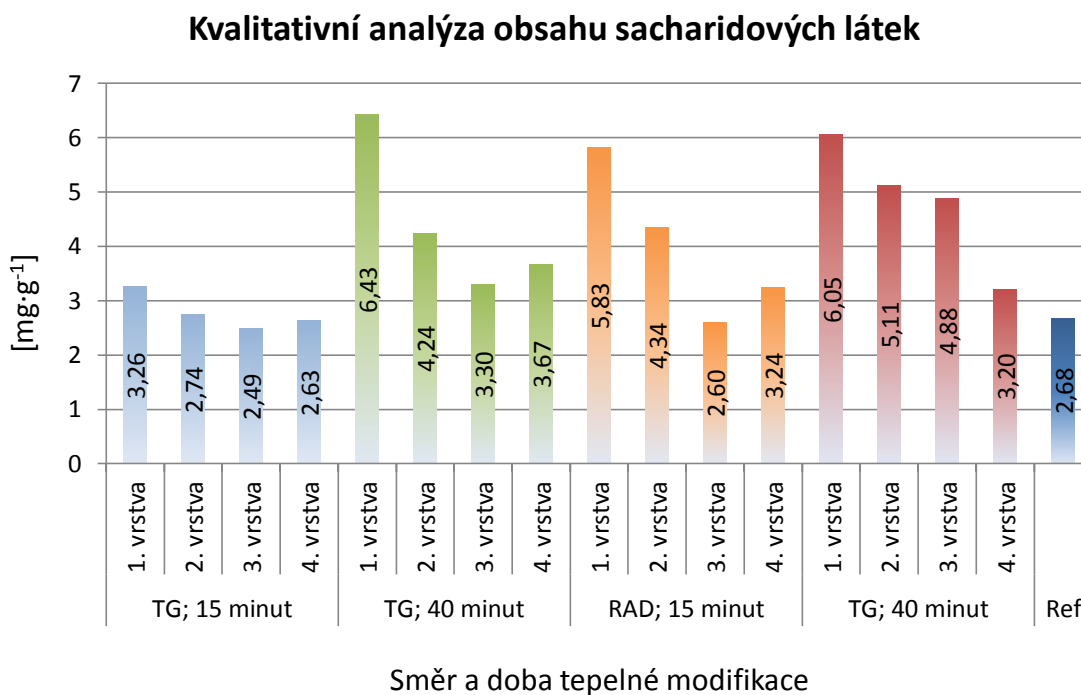
## 5.5 Chemická analýza vrstev

Analýze bylo podrobena 17 odebraných vrstev povrchu z celkem čtyř tepelně upravených tělísek a jednoho referenčního. Z důvodu malého množství vzorků nelze

získaná data prohlásit za směrodatná, ale vzhledem k tomu, že byl u všech souborů pozorován obdobný trend, lze v našem případě z naměřených dat vycházet. Malý počet analyzovaných vzorků zapříčinil i důvod, že nebylo možné využít statistickou analýzu, ale zpracovány byly konkrétní hodnoty výsledků rozboru.

### 5.5.1 Obsah monosacharidových látek

Sloupcový graf (obrázek 29) zobrazuje obsah monosacharidů v dřevní hmotě [ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ]. Nejvyšší obsah cukrů (6,43 mg) byl naměřen u první vrstvy vzorku, který byl radiálně tepelně namáhán po dobu 40 minut. Stejný vzorek pak vykazoval nejvyšší celkový obsah měřených cukrů ve všech vrstvách (23,46 mg). Protipólem je pak vzorek patnácti minutového radiálního namáhání s nejnižším celkovým obsahem (17,54 mg) i s vůbec nejnižší naměřenou hodnotou (2,49 mg). U všech souborů je zřejmý trend, že s narůstající hloubkou jednotlivých vrstev dochází k postupnému úbytku podílu jednoduchých cukrů. Z grafu je zřejmé, že podíl sacharidů je nejvyšší v prvních vrstvách, v těch, které byly přímo vystaveny tepelnému zdroji a sacharidový podíl postupně klesá, zhruba na hodnotu referenčního vzorku.

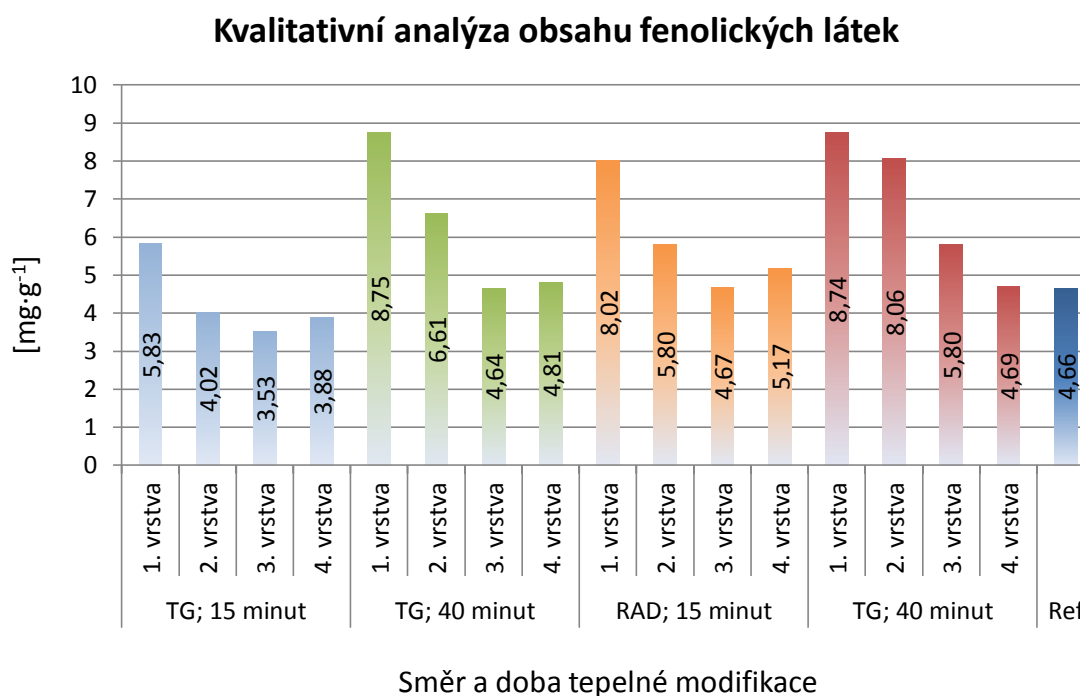


**Obrázek 29:** Obsah monosacharidů v gramu dřevní hmoty

## 5.5.2 Obsah fenolických látek

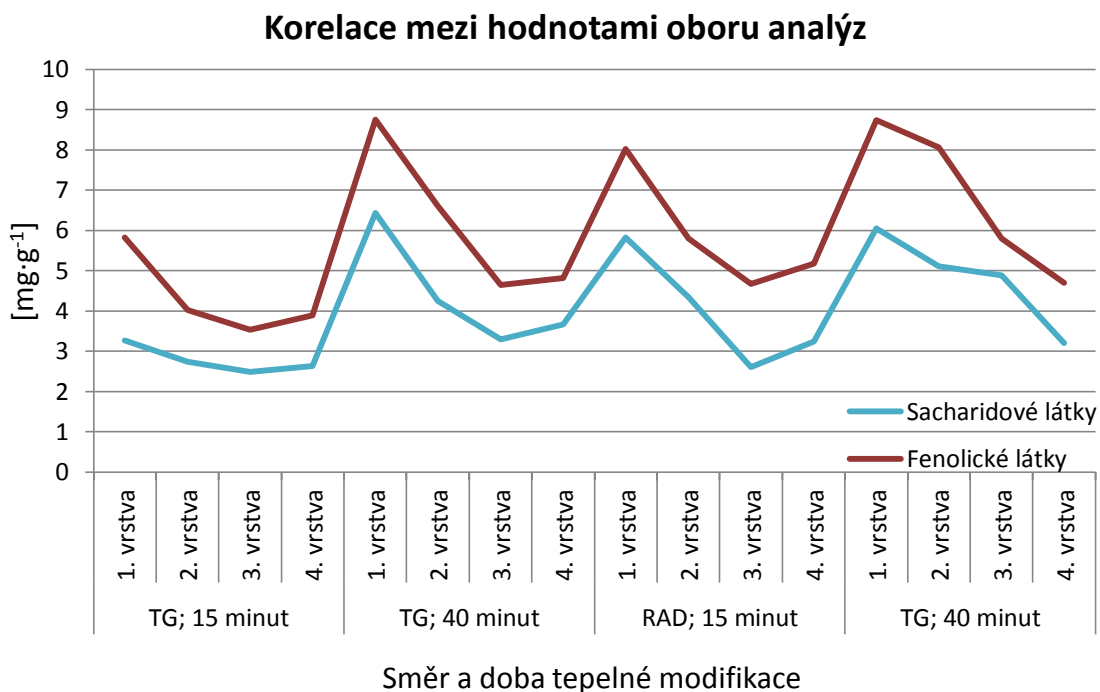
Stejně jako monosacharidy i fenolické látky se tvoří během rozkladu složek dřeva (zejména ligninu) vysokou teplotou, proto se dalo předpokládat, že trend naměřených hodnot by měl zhruba korespondovat s hodnotami získanými prvním typem analýzy. O tom svědčí získané hodnoty, které stejně jako u analýzy sacharidů vykazují nejvyšší celkový obsah (23,46 mg) u 40 minut radiálně namáhaného vzorku a platí, že v téže vzorku byla naměřena nejvyšší hodnota (6,43 mg). I v případě vzorku s nejnižším obsahem zkoumané látky (17,26 mg) výsledek odpovídá prvnímu typu rozboru, tedy radiálně namáhaný po dobu 15 minut. Oproti jednoduchým cukrům je hmotnost fenolických látek v dřevní hmotě o něco málo vyšší.

Graf zobrazený na obrázku 31 zachycuje výsledky rozboru sacharidových a fenolických látek společně, zde je jasně patrné, že výsledky obou analýz jsou podobné a trend jejich hodnot se navzájem kopíruje.



**Obrázek 30:** Obsah fenolických látek v gramu dřevní hmoty





**Obrázek 31:** Porovnání obsahu monosacharidových a fenolických látek

## 5.6 Mechanické zkoušky

### 5.6.1 Tvrdost

Shapiro – Wilkova analýza potvrdila, že naměřená data v jednotlivých souborech pro oba směry odpovídají normálnímu rozložení. Grubbsův test extrémních hodnot v případě souborů, které byly namáhány tangenciálně, neukázal, že by některé z hodnot vykazovaly významnou odchylku, která by mohla být považována za chybu. Naopak hned dvě nejvyšší hodnoty byly odstraněny u souborů, které byly namáhány v radiálním směru, konkrétně po dobu 40 minut a referenční. Test ANOVA, který dokáže rozlišit statisticky významné rozdíly mezi soubory, potvrdil nulovou hypotézu pro tangenciálně namáhané soubory, z toho lze vyvodit, že u souborů nelze mluvit o významné odchylce mezi středními hodnotami, tedy konstatování, že doba tepelné úpravy nemá významný vliv na změnu tvrdosti. Naopak u radiálně namáhaných souborů test definoval rozdíly, na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ , jako významné, z toho vyplývá, že doba úpravy má vliv na tvrdost materiálu, proto bylo zapotřebí vyhodnotit Tukey – Kramerův test. Test potvrdil významné rozdíly mezi všemi soubory. Shrnutí výsledků testů statistické analýzy zachycuje tabulka 15.

Velikost průměrné síly, kterou bylo zapotřebí vynaložit pro vniknutí ocelové kuličky do požadované hloubky 1,4 mm, lze pozorovat na obrázku 33. Statistická analýza vyhodnotila změnu tvrdosti u tangenciálně namáhaných souborů jako statisticky nevýznamnou, naproti tomu vzrůst hodnot u radiálně namáhaných souborů jako významný.

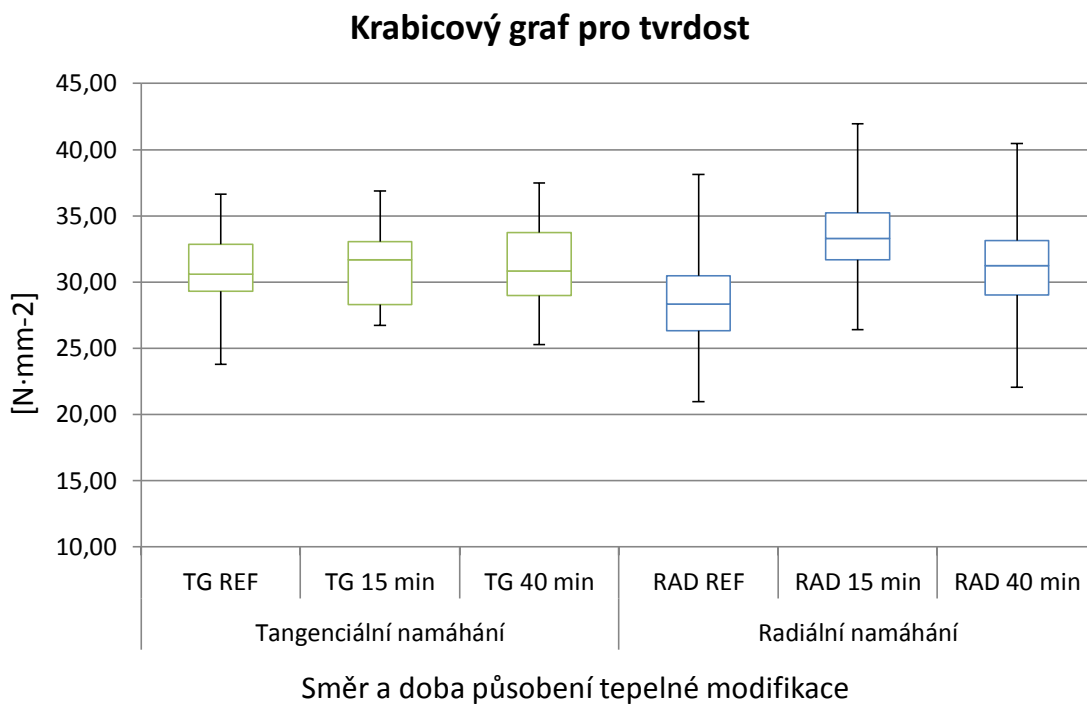
Vliv hustoty jednotlivých vzorků na výslednou sílu, kterou bylo zapotřebí vynaložit pro překonání odporu materiálu proti vniknutí cizího tělesa, je zobrazen na obrázku 34. Proložená lineární přímka trendu dokládá vzájemný vztah mezi oběma veličinami, tedy že se vzrůstající hustotou roste i síla, která musí být vyvinuta k vniknutí předmětu do tělesa.

**Tabulka 15: Výsledky testů statistické analýzy pro tvrdost**

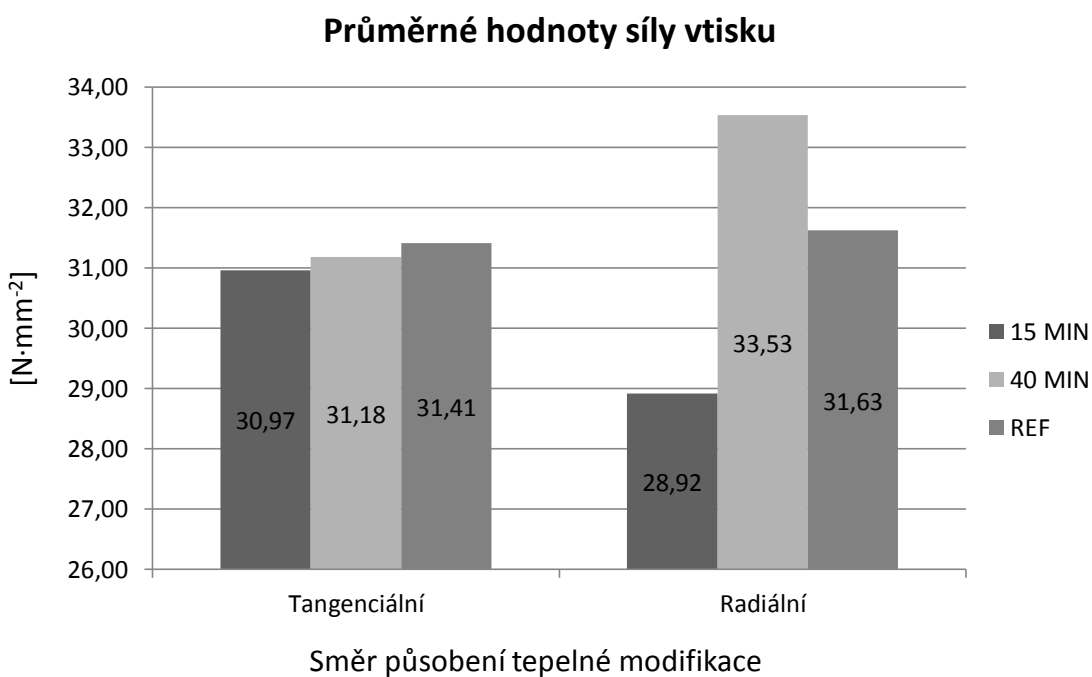
	Přehled výsledků testů statistické analýzy					
	Modifikováno v TG směru			Modifikováno v RD směru		
	Ref	15 min	40 min	Ref	15 min	40 min
Shapiro - Wilk	0,980	0,944	0,960	0,927	0,981	0,942
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )	0,927					
Grubbs MIN	2,591	1,523	1,813	1,829	2,036	2,243
Grubbs MAX	2,045	1,951	1,797	<b>3,251</b>	2,410	<b>3,123</b>
Úroveň spolehlivosti = 95 %	2,745					
ANOVA	0,861			<b>0,0002</b>		
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )	0,050					
Tukey - Kramer	Statisticky významné rozdíly mezi soubory					
Ref / 15 min	-			<b>4,611</b>		
15 min / 40 min		-			<b>1,906</b>	
Ref / 40 min		-			<b>2,705</b>	
Kritická hodnota pro ( $\alpha = 0,05$ )		-			<b>1,502286342</b>	

**Tabulka 16: Hodnoty statistických veličin pro sílu vtisku**

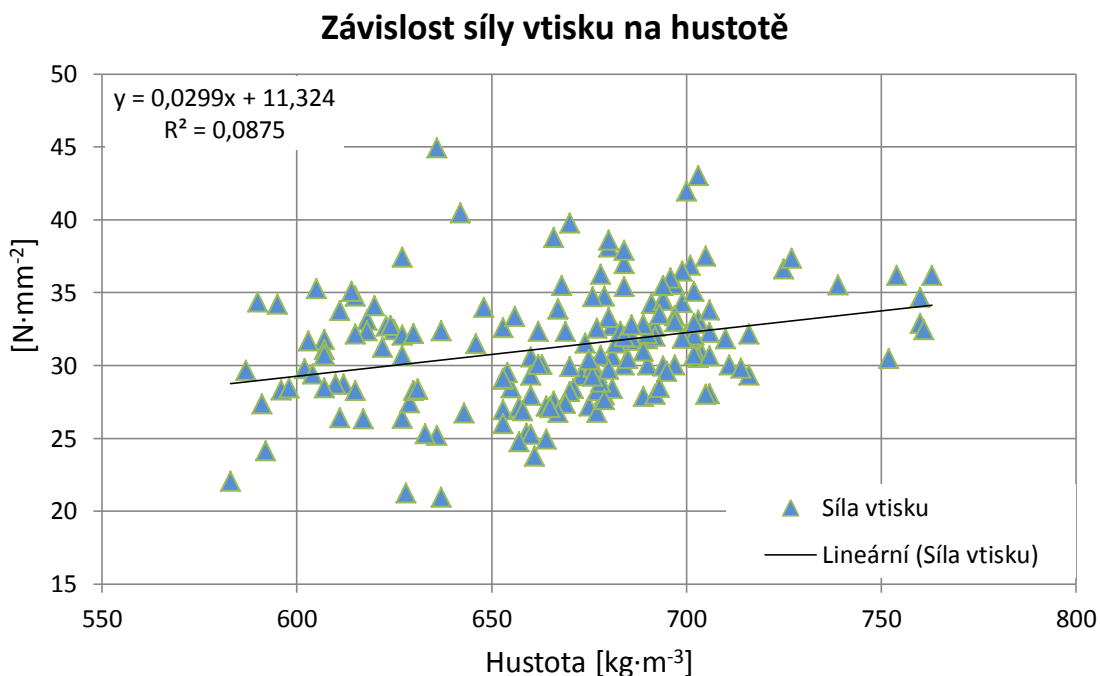
Statistická veličina	Síla vtisku					
	Modifikováno v TG směru			Modifikováno v RD směru		
	Ref	15 min	40 min	Ref	15 min	40 min
Počet vzorků	30	30	30	29	30	29
Aritmetický průměr	30,97	31,18	31,41	28,92	35,93	32,72
Medián	30,60	31,68	30,85	28,43	33,29	31,38
Minimum	23,79	26,73	25,28	20,98	26,41	22,07
Maximum	36,63	36,88	37,49	43,04	41,96	44,94
Směrodatná odchylka	2,82	2,97	3,44	4,42	3,56	4,34
Variační koeficient [%]	9,09	9,53	10,95	15,28	9,90	13,25



**Obrázek 32:** Krabicový graf pro soubory tvrdosti po odstranění extrémních hodnot



**Obrázek 33:** Průměrné hodnoty sil vtisku pro jednotlivé soubory



**Obrázek 34:** Závislost síly vtisku na hustotě

#### 5.6.2 Modul pružnosti v ohybu (MOE)

Aplikování Shapiro – Wilkovy analýzy na zkoušené soubory se prokázalo, že naměřená data ve všech případech odpovídají Gaussovu rozdělení dat, proto mohl být použit Grubbsův test extrémních hodnot. Na základě výsledků tohoto testu byla vyloučena nejvyšší hodnota v případě referenčního souboru, který byl namáhán radiálně, u ostatních souborů jejich extrémy nevykazovaly tak významné odchylky, které by mohly být považovány za chybu. Statisticky významné odchylky mezi středními hodnotami jednotlivých souborů byly, za pomoci testu ANOVA, zjištěny u obou skupin souborů. Proto bylo zapotřebí provést Tukey – Kramerův test, ten na základě naměřených dat a jejich porovnání s kritickou hodnotou potvrdil významné rozdíly mezi referenčními a upravenými soubory a naopak je nepotvrdil vzájemně mezi upravenými soubory a to shodně u obou směrů. Shrnutí výsledků testů zachycuje tabulka 17.

Grafické znázornění průměrných hodnot modulu pružnosti (obrázek 36) slouží k přehledné interpretaci, jak se s dobou tepelné úpravy tato charakteristika měnila. Statisticky významné rozdíly středních hodnot byly zjištěny mezi upravenými a neupravenými soubory shodně pro obě skupiny namáhání.

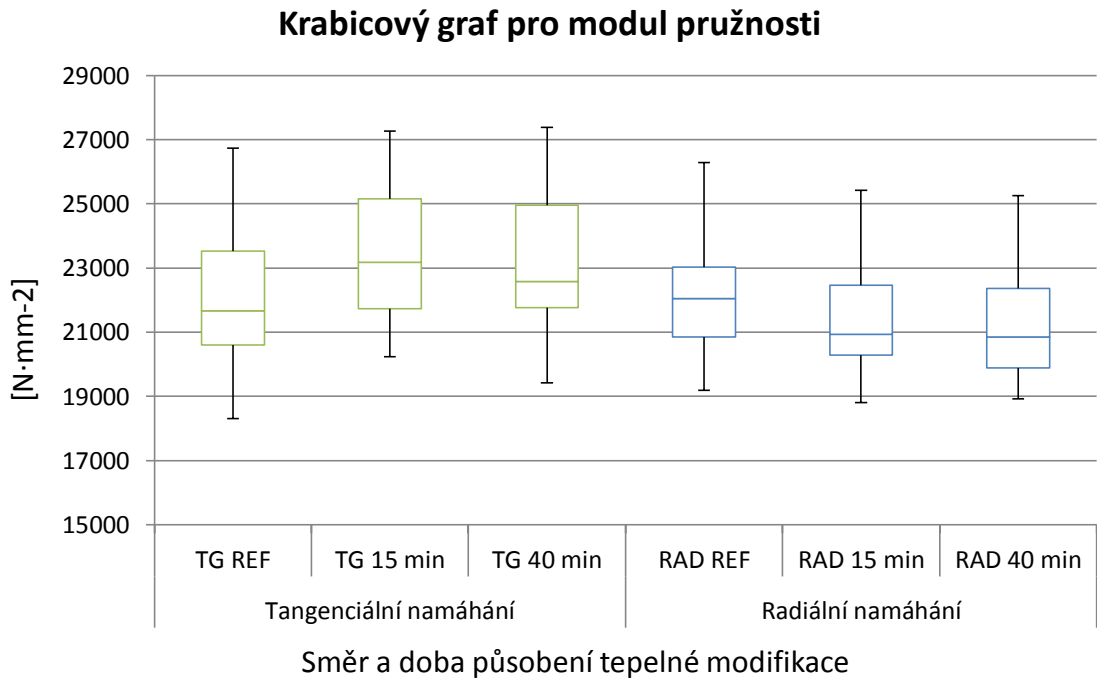
Graf, který je zobrazen na obrázku 39, ukazuje závislost modulu pružnosti na hustotě. Závislost těchto dvou veličin dokládá přímka lineární regrese, která je proložena jednotlivými hodnotami. Do grafu jsou zahrnuty hodnoty bez rozlišení směru namáhání a doby tepelné úpravy, z čehož vyplývá, že skutečnost vlivu hustoty na modul pružnosti se s typem úpravy nemění.

**Tabulka 17: Výsledky testů statistické analýzy pro modul pružnosti**

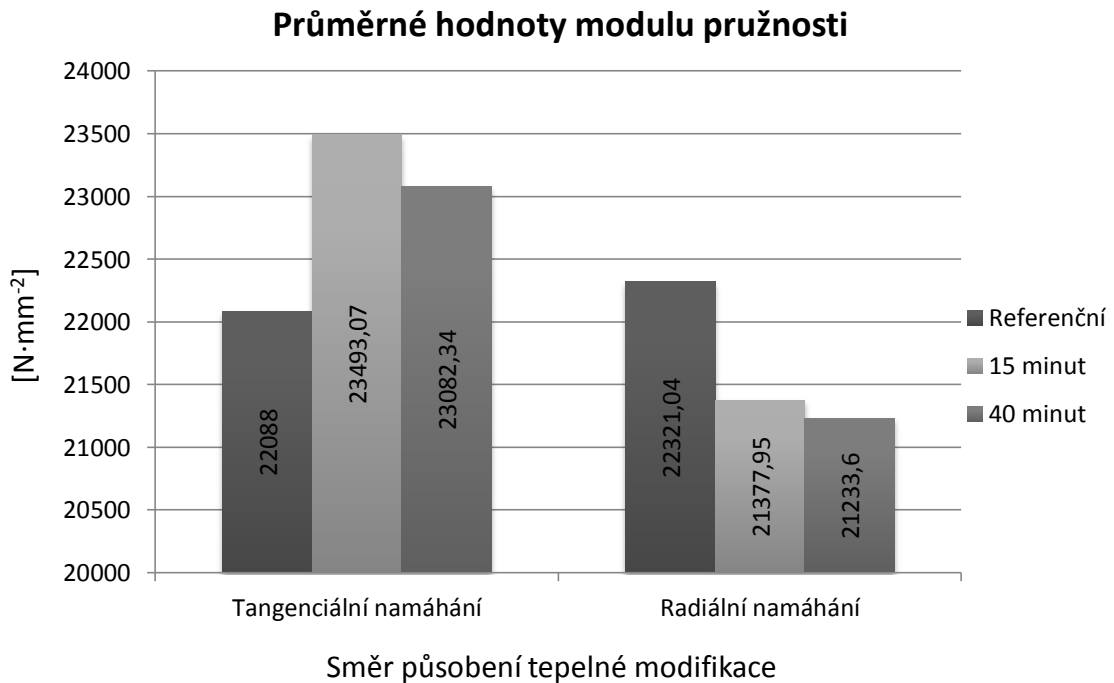
	Přehled výsledků testů statistické analýzy					
	Modifikováno v TG směru			Modifikováno v RD směru		
	Ref	15 min	40 min	Ref	15 min	40 min
Shapiro - Wilk	0,958	0,947	0,946	0,944	0,953	0,930
Kritická hodnota pro $\alpha = 0,05$	0,927					
Grubbs MIN	1,771	1,591	1,651	1,562	1,623	1,333
Grubbs MAX	2,176	1,847	1,941	<b>3,032</b>	2,546	2,326
Úroveň spolehlivosti = 95 %	2,745					
ANOVA	<b>0,045</b>			<b>0,0432</b>		
Kritická hodnota pro $\alpha = 0,05$	0,050					
Tukey - Kramer	Statisticky významné rozdíly mezi soubory					
Ref / 15 min	<b>1405,069</b>			<b>943,097</b>		
15 min / 40 min		410,727			144,340	
Ref / 40 min	<b>994,341</b>			<b>1087,437</b>		
Kritická hodnota pro $\alpha = 0,05$	791,116			660,423		

**Tabulka 18: Hodnoty statistických veličin modulu pružnosti**

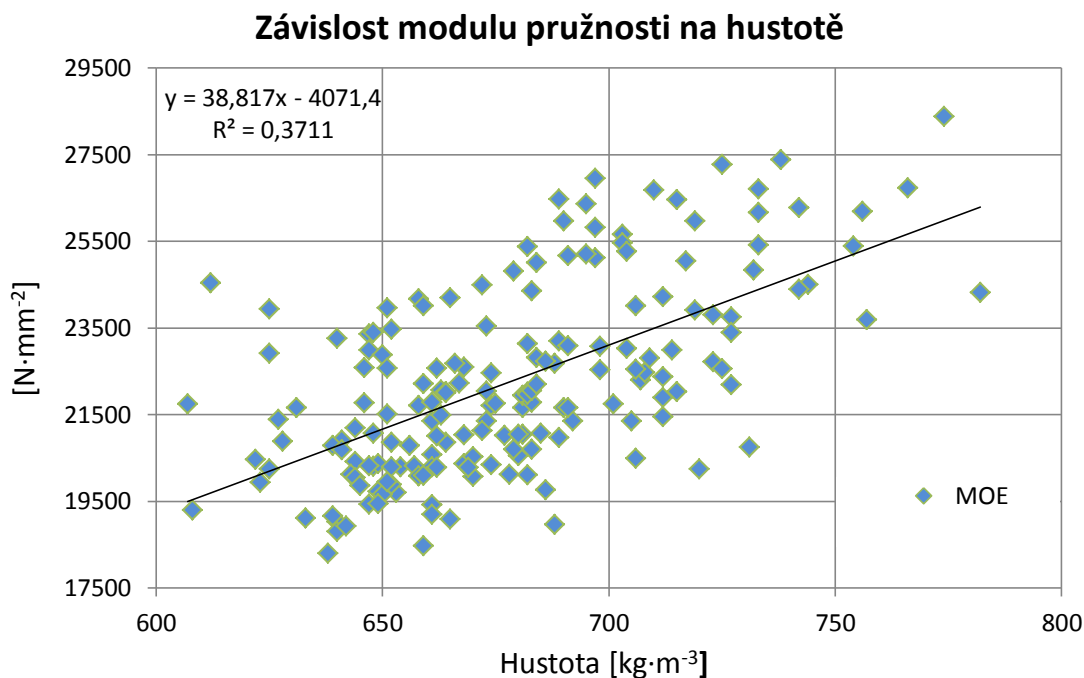
Statistická veličina	Síla vtisku					
	Tangenciální zatížení			Radiální zatížení		
	Ref	15 min	40 min	Ref	15 min	40 min
Počet vzorků	30	30	30	29	30	30
Aritmetický průměr	22088,00	23493,07	23082,34	22321,04	21377,95	21233,60
Medián	21662,09	23176,15	22572,30	22124,51	20936,46	20856,51
Minimum	18304,08	20242,03	19420,46	19196,11	18804,18	18924,46
Maximum	26737,46	27268,07	27386,05	28386,74	25414,72	25263,87
Směrodatná odchylka	2173,37	2078,41	2255,52	2034,82	1612,60	1762,54
Variační koeficient [%]	9,84	8,85	9,77	9,12	7,54	8,30



**Obrázek 35:** Krabicový graf pro modul pružnosti po odstranění extrémních hodnot



**Obrázek 36:** Průměrné hodnoty modulů pružnosti pro jednotlivé soubory



**Obrázek 37:** Závislost modulu pružnosti na hustotě

### 5.6.3 Mez pevnosti v ohybu (MOR)

Test normality prokázal, že u všech skupin měřených souborů, na hladině významnosti  $\alpha = 0,05$ , byly splněny podmínky normálního rozložení. Potvrzení normality souborů, za pomoci Shapiro – Wilkova testu, mohl být aplikován Grubbsův test extrémních hodnot, který definoval potenciální hrubou chybu v pouze v jednom případě a to u souboru, který byl upravován v radiálním směru po dobu 40 minut. Analýza statisticky významných odchylek ANOVA, která definuje vztah, mezi středními hodnotami jednotlivých souborů, odhalila významné rozdíly mezi oběma skupinami. Upřesnění, které soubory se od sebe navzájem statisticky významně liší, a které nikoliv, bylo stanoveno za pomoci Tukey – Kramerova testu. Na základě srovnání kritické hodnoty s hodnotami, které charakterizují rozdíly mezi dvěma soubory, se ukázaly významné rozdíly mezi ošetřenými a neošetřenými soubory pro obě skupiny. Stejně tak u obou skupin nebyl potvrzen statisticky významný rozdíl mezi soubory, které byly zatěžovány vysokou teplotou po různou dobu. Shrnutí výsledků testů zachycuje tabulka 19.

Průměrné hodnoty meze pevnosti jsou znázorněny ve sloupcovém grafu (obrázek 39), z něj lze vyčíst, že průměrné hodnoty MOR se po vysokoteplotní modifikaci zvýšily a

to u obou směrů namáhání. Statistická analýza potvrdila, že se jedná o statisticky významnou změnu hodnot meze pevnosti.

Grafické znázornění závislosti meze pevnosti na hustotě (obrázek 40) jasně vypovídá o korelaci mezi těmito dvěma veličinami, stejně jako tomu bylo v případě již zmíněných mechanických vlastností modulu pružnosti a tvrdosti.

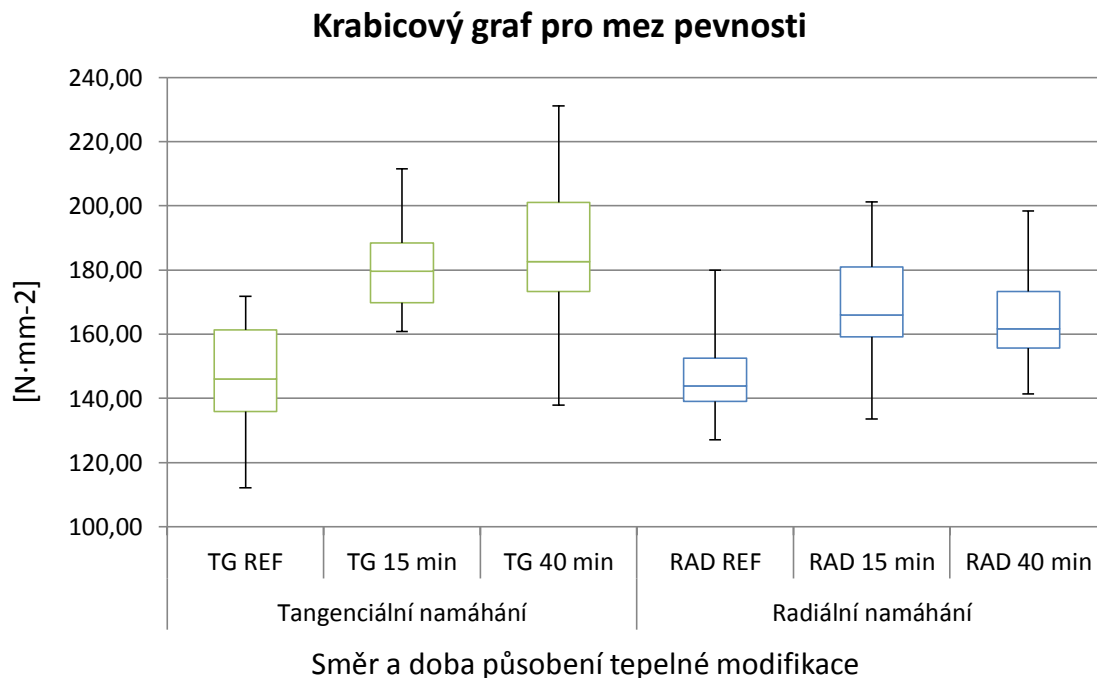
**Tabulka 19: Výsledky testů statistické analýzy pro mez pevnosti**

	Přehled výsledků testů statistické analýzy					
	Modifikováno v TG směru			Modifikováno v RD směru		
	Ref	15 min	40 min	Ref	15 min	40 min
Shapiro - Wilk	0,968	0,964	0,975	0,936	0,959	0,928
Kritická hodnota pro $\alpha = 0,05$	0,927					
Grubbs MIN	2,425	1,586	2,235	1,556	2,227	1,751
Grubbs MAX	1,707	2,307	2,124	2,440	1,872	<b>3,059</b>
Úroveň spolehlivosti = 95 %	2,745					
ANOVA	<b>0,000</b>			<b>0,0000</b>		
Kritická hodnota pro $\alpha = 0,05$	0,050					
Tukey - Kramer	Statisticky významné rozdíly mezi soubory					
Ref / 15 min	<b>34,271</b>			<b>22,630</b>		
15 min / 40 min		4,287			3,902	
Ref / 40 min	<b>38,558</b>			<b>18,729</b>		
Kritická hodnota pro $\alpha = 0,05$	6,188			5,459		

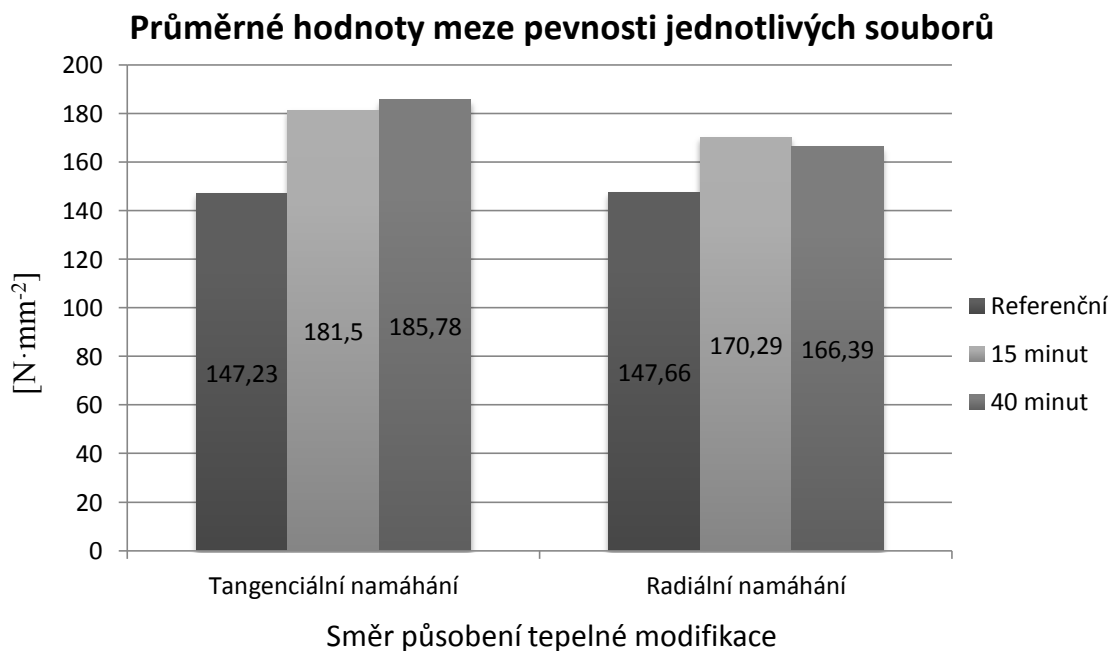
**Tabulka 20: Hodnoty statistických veličin meze pevnosti**

Statistická veličina	Síla vtisku					
	Tangenciální zatížení			Radiální zatížení		
	Ref	15 min	40 min	Ref	15 min	40 min
Počet vzorků	30	30	30	30	30	29
Aritmetický průměr	147,23	181,50	185,78	147,66	170,29	166,39
Medián	146,08	179,55	182,61	143,90	165,95	162,09
Minimum	112,21	160,85	137,97	127,07	133,57	141,42
Maximum	171,88	211,53	231,23	179,95	201,16	210,01
Směrodatná odchylka	14,69	13,24	21,76	13,46	16,77	14,50
Variační koeficient [%]	9,98	7,30	11,71	9,11	9,85	8,72

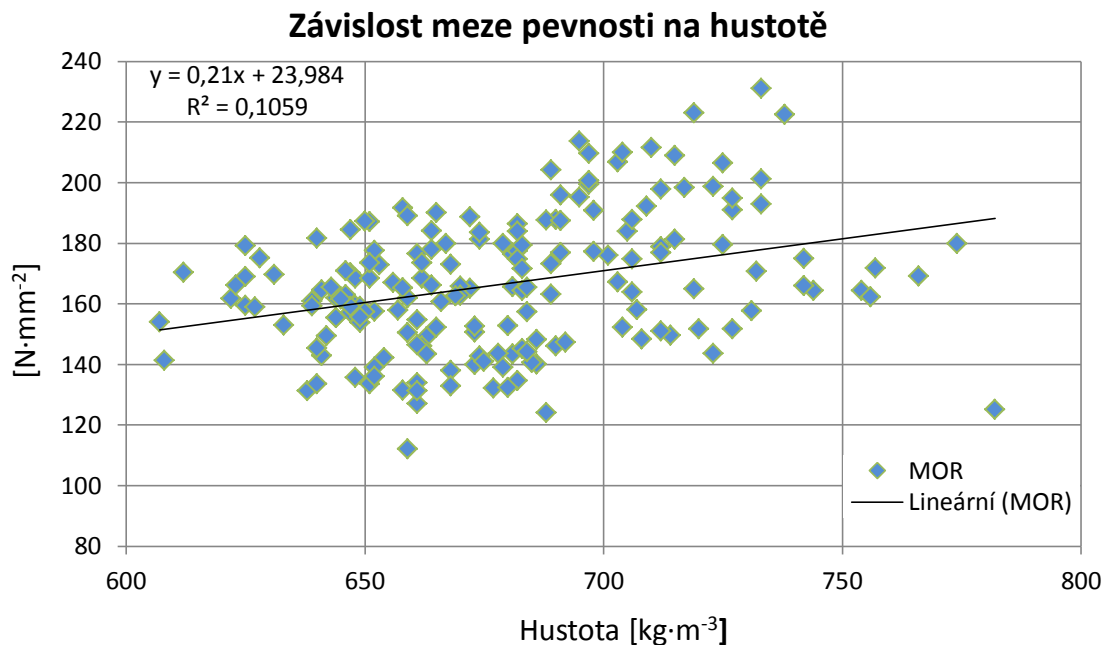




**Obrázek 38:** Krabicový graf pro mez pevnosti po odstranění extrémních hodnot



**Obrázek 39:** Průměrné hodnoty meze pevnosti pro jednotlivé soubory



**Obrázek 40:** Graf závislosti meze pevnosti na hustotě

## 5.7 Barevné změny

Rozdíl barevného spektra povrchu mezi neupraveným a upraveným dřevem je zřejmý na první pohled, z toho důvodu hodnotit rozdíl  $\Delta E$  podle uvedené škály barevných změn nemá vypovídající hodnotu, protože výsledek by vždy odpovídal „značným barevným změnám“ ( $\Delta E$ : 6 a více). Zajímavější ovšem je porovnat, jak se odlišují barvy povrchových vrstev mezi upravenými soubory.

Z naměřených výsledků a z nich vypočtené  $\Delta E$  bylo zjištěno že, rozdíl mezi neupravenými soubory byl 3,37, to odpovídá kategorii střední změna barvy ( $\Delta E$ : 3 až 6), z obou souborů bylo vyhodnoceno, že tangenciální řezivo má tmavší odstín. Získané výsledky dále ukazují, že výraznější změna barvy oproti neupravenému stavu došlo při tangenciálním zahřívání zkoušených tělísek a to tak výrazně, že výsledné rozdíly  $\Delta E$  jsou vyšší než 6, tzn. značná barevná změna. Přehled získaných hodnot zobrazuje tabulka 21.

**Tabulka 21: Průměrné hodnoty získaných parametrů určující body v rovnoměrné kolorimetrické soustavě CIELAB**

	Souřadnice kolorimetrické soustavy CIELAB					
	Radiální zatížení			Tangenciální zatížení		
	15 MIN	40 MIN	REF	15 MIN	40 MIN	REF
L*	53,08	42,09	70,35	45,13	34,12	73,77
a*	8,21	7,85	7,76	8,53	7,00	7,04
b*	18,38	15,26	18,96	16,85	10,26	19,81
$\Delta E$	17,26	28,20	-	28,63	39,53	-

## 6 Diskuze

Obsah vlhkosti ve dřevě ukázal, že průměrná rovnovážná vlhkost neupravených vzorků po klimatizaci v ustálených podmínkách prostředí (20 °C a 65 % vlhkosti), dosahuje 11,78 %, což byl očekávaný výsledek vzhledem k hodnotám, které uvádí např. Požgaj a kol. 1993, že za těchto podmínek se RVD standardně pohybuje kolem 12 %. Mírnou variabilitu mezi dřevinami způsobuje konkrétní druh, pro který je stanovena. Vyhodnocení průměrných hodnot upraveného dřeva také přineslo očekávaný trend, jelikož snížení příjmu vlhkosti je u tepelně ošetřeného dřeva považováno za jedno z nejdůležitějších dopadů termické úpravy, jak v literatuře uvádí např. Čermák (2013), Jämsä a Viitaniemi (2001), Kamdem a kol. (2002), Kollmann a Shneider (1963). Vzhledem k nezvyklé formě tepelné úpravy můžeme v případě provedené zkoušky mluvit pouze o průměrné hodnotě RVD vzorku. Stanovená RVD je dána tím, že úprava je provedena pouze z jedné strany a do určité hloubky, z toho plyne, že RVD zbylé části vzorku by neměla být ovlivněna.

Uvedené výsledky zobrazují, že v případě tangenciálně namáhaných souborů dochází k poklesu rovnovážné vlhkosti i s časem úpravy, zatímco u radiálně namáhaných souborů byl pozorován statisticky významný rozdíl RVD pouze mezi upravenými a neupraveným souborem.

Ztráta hmotnosti během vysokoteplotní úpravy je uváděna např. Esteves a kol (2008) a Welzbacher a Rapp (2002), kteří se zabývají danou problematikou. Z toho důvodu bylo možné předpokládat, že se tento trend projeví i u provedeného kontaktního ošetření. Úbytek hmotnosti je dokonce brán jako jeden z hlavních znaků kvality procesu i samotného produktu, který byl úpravě podroben. V tomto konkrétním případě je pravděpodobné, že stejně jako je tepelná úprava v průřezu provedena nerovnoměrně, tak i úbytek hmotnosti není ve všech vrstvách průřezu stejný. Rozdíl mezi úbytkem hmotnosti a dobou působení tepelného ošetření není zvláště výrazný, jak je patrné z dosažených výsledků.

Úbytek hustoty úzce souvisí se ztrátou hmotnosti, jelikož do rovnice vstupuje jako čítec, z čehož vyplývá, že s poklesem hmotnosti se předpokládá i pokles hustoty. Stejný dopad na upravené dřevo byl publikován i Čermák (2013).

Tepelná úprava se při testu nasáklivosti u radiálně namáhaných vzorků neprojevila a výsledky hmotnostního přírůstu v čase zhruba odpovídají referenčním vzorkům. Oba tangenciálně namáhané soubory dokonce vykazují vyšší příjem kapaliny než zmíněné soubory. Pozorovaný jev odlišného chování upravených souborů v různých směrech mohl být způsoben následkem kontaktní modifikace, která působila pouze na jednu stranu vzorku, kde také došlo k největším změnám v chemické a anatomické struktuře. Jak uvádí Horáček (2008), propustnost dřeva je u radiálního směru větší než v případě tangenciálního. Navíc zmíněný nárůst nasáklivosti může být způsoben zvýšeným obsahem pórů vlivem narušení buněčných stěn a ztenčení, které podle Fengel a Weneger (1989) a Hietala a kol. (2002) doprovází tepelnou modifikaci. U souborů, které byly namáhány ve stejném směru, se neprojevila rozdílná doba působení tepelného média.

Výsledky chemické analýzy vypovídají o nerovnoměrné úpravě testovaných vzorků. Zvýšený obsah monosacharidů ve dřevě vypovídá o degradaci polysacharidů (hemicelulóz a celulózu), ke které dochází vlivem působení vysoké teploty na dřevo. Stejně tak se zvyšuje podíl fenolických látek, jakožto důsledek degradace složek dřeva zejména ligninu. Zmíněné dopady tepelné modifikace na chemické složení uvádějí Boonstra a Tjeerdsma (2006b), Esteves (2008b) i jiní autoři. Z toho důvodu byla pro vyhodnocení tepelné modifikace spektrofotometricky analyzována přítomnost právě těchto látek ve dřevě.

Chemický rozbor prokázal, že obsah zkoumaných látek je nejvyšší ve vrstvách, které byly přímo vystaveny tepelnému zdroji a jejich podíl se postupně snižuje až na podíl pohybující se kolem hodnot referenčního vzorku. Z uvedeného lze odvodit, že míra tepelné úpravy nejhlubších vrstev je minimální. Můžeme také pozorovat, že první soubor (rad 15 min.) se od ostatních odlišuje nižšími hodnotami a naopak třetí soubor (tg 15 min.) má podobné hodnoty jako soubory, které byly zatěžovány po dobu 40 minut. Je těžké stanovit důvod těchto rozdílů, jelikož se vycházelo pouze z jednoho vzorku a nelze tedy jednoznačně říci, jestli se jedná o nahodilou chybu nebo o vypovídající hodnoty za celý soubor. Vycházel bych ale ze skutečnosti, že doba úpravy by se měla na obsahu monosacharidů projevit, tudíž lze soudit, že údaje pro 1. soubor jsou lépe vypovídající. Nicméně klesající trend je i u těchto výsledků zřejmý. Z grafu lze dále vyčíst, že tři ze čtyř souborů vykazují mírné zvýšení podílu monosacharidů v poslední (nejhlubší) vrstvě. Tento jev může být způsoben působením

naakumulovaného tepla uvnitř vzorku, které působí i po ukončení modifikace. Z grafů lze také vyčíst, že jak bylo očekáváno, tak se doba působení tepelné úpravy projevila i na hloubce proniknutí pod povrch dřeva.

Vliv směru tepelného namáhání na velikost podílu testovaných látek ze získaných výstupů nelze určit.

Mechanické zkoušky byly provedeny po několikadenní klimatizaci při atmosférických podmínkách. U referenčních vzorků byla pomocí gravimetrické metody stanovena průměrná RVD 9,11 % a upravené soubory měly průměrnou hodnotu v rozsahu 6,8–7,2 %.

Měření tvrdosti materiálu ukázalo, že u obou směrů namáhání došlo k nárůstu síly, která byla potřeba k zatlačení tělesa do požadované hloubky. U tangenciálního namáhání došlo mezi základním souborem a modifikovanými soubory k pozvolnému zvyšování odporu vzorků proti vniku cizího tělesa, ale ze statistického hlediska byla tato odchylka nevýznamná. Na základě tohoto tvrzení lze konstatovat, že se neprokázal vliv modifikace na zkoušenou vlastnost. V případě souborů, na které působila tepelná modifikace v radiálním směru, byl nárůst potřebné síly jednoznačný. Získané výsledky korespondují s výsledky, které ve své práci uvádí Boonstra (2006), podle jeho výzkumu tvrdost v radiálním směru vzrostla stejně jako v případě zkoušených souborů. Mechanické vlastnosti mimo jiné ovlivňuje i vlhkost, která je ve dřevě obsažena. Proto lze předpokládat, že snížení RVD vlivem modifikace se na výsledku pozitivně projevilo. Domnívám se, že k nárůstu síly, která byla potřeba k překonání odporu materiálu, mohlo dojít i vlivem kompaktnější struktury, kterou způsobilo zvýšení podílu krystalicity u hlavních složek dřeva, jako následek vysokoteplotní modifikace, jak uvádí Boonstra a kol. (2007).

Dopady vysokoteplotní modifikace na modul pružnosti, které se uvádějí v literaturách, jsou různé. Někteří autoři, jako Esteves a kol. (2008), uvádí jejich zvýšení hodnot, jiní, např. Bengtsson a kol. (2002) Tjeerdsma a kol. (1999b) a Kamdem a kol. (2002), naopak jejich pokles. Rozdílné výsledky jsou pravděpodobně způsobeny podmínkami úpravy. Z toho důvodu nebylo možné předvídat, jak se úprava projeví v případě kontaktní modifikace. Nakonec, stejně jako se rozcházejí výsledky autorů, byly i získané výsledky rozporuplné. Zatímco u souborů, které byly namáhány v tangenciálním směru, výsledné hodnoty modulu pružnosti po úpravě vzrostly, tak pro soubory radiálně namáhané

postupně klesaly. I když byl prokázán obecný trend, že se vzrůstající hustotou roste modul pružnosti, nelze říci, že by výsledné hodnoty vycházely pouze z hustoty, jelikož neplatí, že soubor s vyšší průměrnou hodnotou MOE převyšuje jiné soubory i průměrnou hodnotou naměřených hustot a naopak to nelze říci ani o nižších hodnotách. Z toho důvodu se domnívám, že na konečném výsledku se nejvíce projevil směr, kterým byly soubory namáhány.

Podle autorů Bengtsson a kol.(2002), Čermák (2013) a Kamdem a kol. (2002) má vysokoteplotní modifikace negativní vliv na mez pevnosti v ohybu. Z toho důvodu bylo očekáváno, že podobných výsledků bude dosaženo i v případě zkoušek pevnosti kontaktní tepelné úpravy. Získané výsledky však ukazují, že hodnoty meze pevnosti po úpravě oproti očekávání vzrostly.

Fakt, že jsou získané hodnoty v rozporu s výsledky, které byly publikovány jinými autory, může být způsoben mnoha proměnnými, které celý proces ovlivňují. Vliv na konečný výsledek mohlo mít snížení obsahu vlhkosti, která se projevuje zvýšením mechanické pevnosti. Možnou příčinou může být i to, že při snaze zajistit spolehlivý kontakt ohřívané plochy s ošetřovanými vzorky, mohlo dojít k mírnému slisování upravovaných tělísek, i když to nebylo záměrem modifikace. Slisování dřeva vede ke zhuštění dřevních elementů, s čímž je spojena zvýšená odolnost proti mechanickému namáhání.

Tepelná modifikace ovlivňuje i výsledný vzhled upraveného dřeva, který se vzrůstající dobou tepelné úpravy dostává tmavší odstín, tento trend byl jasně patrný i pro vzorky, které byly použity pro účely této diplomové práce. Z toho vyplývá, že stejně jako u jiných způsobů vysokoteplotních modifikací, i při kontaktním ohřevu je závislost barevného odstínu na době úpravy zřejmá.

Existují online simulátory, které jsou schopny zobrazit požadovaný barevný odstín na základě uvedených  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  souřadnic.

Mezi výhody takto provedené úpravy bych určitě zařadil její rychlost, protože již po 15 minutách bylo možné, prostřednictvím zkoušek, pozorovat změny, které se v ošetřených vzorcích odehrály. Pozorováno bylo například snížení RVD, jako jeden z hlavních výstupů vysokoteplotní modifikace, dokonce došlo i ke zvýšení meze pevnosti, která při alternativních úpravách naopak vykazuje pokles. S rychlostí úpravy souvisí výrazné

snížení nákladů oproti jiným procesům tepelné úpravy, to může vést mimo jiné ke zvýšení konkurenceschopnosti takových výrobků. Naopak nevýhodou je, že uvedená modifikace musí být provedena na hotových produktech s pravoúhlým průřezem, jako jsou právě vlisy, střešní šindele, lamely nebo stavební řezivo, navíc je možné současně ohřívat pouze dvě plochy tělesa. Další nevýhodou pak může být to, že takto upravený materiál neposkytuje nebo jen velmi omezeně, možnost jeho přebroušení, což může být konkrétně na příkladu parketových vlisů problém. Z těchto důvodů bych doporučoval další výzkum zaměřit na stavební řezivo, u kterého by tato úprava mohla mít značné uplatnění, pokud by se získané výsledky potvrdily.



## 7 Závěr

Hlavní náplní práce bylo provést vysokoteplotní modifikaci bukových vzorků tak, aby se dopad úpravy na zatěžované vzorky projevil v jejich průřezu nerovnoměrně, tzn. dopad úpravy směrem od povrchu, ke středu průřezu klesá. Zvolena byla kontaktní metoda tepelné úpravy.

Ošetřené vzorky byly rozděleny do šesti souborů, které se lišily dobou a směrem tepelného zatěžování, na jednotlivých souborech byly měřeny požadované vlastnosti. Výsledek modifikace byl analyzován chemickým rozbohem z připravených vrstev vzorku.

Chemický rozbor potvrdil jeden z cílů práce, že vliv modifikace u jednotlivých vrstev se směrem do středu průřezu snižuje. Výsledné mechanické a fyzikální vlastnosti většinou potvrdily tvrzení jiných autorů o dopadu tepelné modifikace. Výsledky se shodovaly v poklesu rovnovážné vlhkosti, ve ztrátách hmotnosti, u poklesu hustoty i nárůstu tvrdosti. Naopak rozdílné výsledky byly získány u zkoušek meze pevnosti, u kterých, navzdory predikci, byly naměřeny vyšší hodnoty než u referenčních vzorků. Odlišné výsledky vykazovaly zkoušky modulu pružnosti. Kde u souborů, na které působila tepelná úprava v tangenciálním směru, bylo zaznamenáno zvýšení a u souborů tepelně zatížených v radiálním směru naopak pokles hodnot v porovnání s neupravenými vzorky.

Závěrem byly zmíněny výhody a nevýhody kontaktní modifikace. Jako hlavní výhoda byla uvedena rychlost úpravy a výsledné vlastnosti upravených vzorků, nevýhodou pak nutnost provádět tepelnou modifikaci na hotových produktech, které musí být obdélníkového nebo čtvercového průřezu, jako jsou vlasy, šindele, lamely ale i stavební řezivo. Na základě zkušeností a výsledků získaných touto prací, doporučuje autor zaměřit další výzkum právě na zmíněné stavební řezivo.

## 8 Summary

The main goal of the thesis was to perform a high-temperature modification of beech samples using the method which causes an unequal effect of a modification in a cross-section of samples (the effect of the modification decreases from the surface to the center). The thermal modification method was chosen.

Treated samples were divided into six sets which differ in the time and the direction of the thermal treatment. Required characteristics were measured on individual sets. The result of the modification was chemically analyzed using prepared layers of the sample.

The chemical analysis confirmed one of the main thesis goals. The influence of the modification of individual layers decreases in direction to the center of a cross-section. Final mechanical and physical properties largely confirmed other author's statements about the impact thermal modification. Results were identical to a decrease equilibrium moisture content, mass loss, in a decrease of a density and in an increase of hardness. Different results turned out in a modulus of rupture, there were measured higher values than in a case of reference samples. Results of modulus of elasticity was in tangential a radial direction different, in tangential direction modulus of elasticity increase and radial direction values decrease in a case of control samples.

The author emphasized advantages and disadvantages of the contact modification. The speed of the modification and resulting characteristics are the main advantages. As disadvantages was mentioned a necessity to application a thermal modification at products. These products must have a rectangular or square cross-section as friezes, shingles, plates, construction timber. Construction timber was recommended for a further research.

## 9 Seznam literatury

### Citované publikace:

- AYADI, N., LEJEUNE, F., CHARRIER, F., and MERLIN, A. *Color stability of heat-treated wood during artificial weathering*. Holz als Roh- und Werkstoff, 2003. ISSN 0018-3768
- BARNA, Milan, KULFAN, Ján, BUBLINEC, Eduard. *Buk a bukové ekosystémy Slovenska: Beech and beech ecosystems of Slovakia*. Vyd. 1. Bratislava: Veda, 2011. ISBN 978-80-224-1192-9.
- BENGTSSONS, C., JERMER, J., BREM, F. *Bending strength of heat-treated spruce and pine timber*. In: International Research Group Wood Preservative, 2002. Doc. No. IRG/WP 02-40242.
- BOONSTRA, M. *Optimisation of a two – stage heat treatment process. Durability aspects*. Wood Science of Technology, 2007a. ISSN 0043-7719
- BOONSTRA, M. *A two-stage thermal modification of wood*, Ph.D. Thesis in Applied Biological Sciences: Soil and Forest management. Henry Poincare University-Nancy, France, 2008.
- BOONSTRA, M., RIJSDIJK, J., SANDER, C., KEGEL, E., TJEERDSMA, B., MILITZ, H., VAN ACKER, J., and STEVENS, M. *Microstructural and physical aspects of heat-treated wood. Part 2. Hardwoods*. Maderas-Cienc Technol, 2006a. ISSN 0718-221X
- BOONSTRA, M., TJEERDSMA, B. *Chemical analysis of heat treated softwoods*. Holz als Roh- und Werkstoff, 2006b. ISSN 0018-3768
- BOONSTRA, M., VAN ACKER, J., TJEERDSMA, B., KEGEL, E. *Strength properties of thermally modified softwoods and its relation to polymeric structural wood constituents*. Annals of Forest Science, 2007. ISSN 1286-4560
- BOURGOIS, J., BARTHOLIN, M., GUYONNET, R. *Thermal treatment of wood: Analysis of the obtained product*. Wood Science and Technology, 1989. ISSN 0043-7719

- BURMESTER, A. *Einfluss einer Wärme–Druck–Behandlung halbtrockenen Holzes auf seine Formbestandigkeit*. Holz als Roh- und Werkstoff, 1973. ISSN 0018 – 3768
- ČERMÁK, Petr. *Thermal Modification of Wood: Process and Properties*. Brno, 2013. Disertační práce. Mendelova univerzita Brno. Lesnická a dřevařská fakulta.
- ESTEVEES, Bruno, PEREIRA, Helena. *Wood modification by heat treatment: A review*. Vyd. BioResources 2009 ISBN 1930-2126
- ESTEVEES, B., DOMINIGOS, I. J., and PEREIRA, H. *Pine wood modification by heat treatment in air*. BioResources, 2008a. ISSN 1930-2126
- ESTEVEES, B., GACA, J., and PEREIRA, H. *Extractive composition and summative chemical analysis of thermally treated eucalypt wood*. Holzforschung, Berlin, 2008b.
- FEIST, C. SELL, J. *Weathering behavior of dimensionally stabilized wood treated by heating under pressure of nitrogen gas*. Wood and fiber science, 1987. 19(2) 183 – 195.
- FENGEL, D., WEGENER, G. *Wood: chemistry, ultrastructure, reactions*. Walter de Gruyter, 1989. ISBN 978-3110084818
- GANDELOVÁ, L., ŠLEZINGEROVÁ, J. *Stavba dřeva. 2.*, nezměn. vyd. Brno: Mendelova univerzita v Brně, 2014. ISBN 978-80-7375-966-7.
- GIEBELER, E. *Dimensionsstabilisierung von Holz durch eine Feuchte/ Wärme/ Druck - Behandlung*. Holz als Roh- und Werkstoff, 1983. DOI 10.1007/BF02608498
- HIETALA, S., MAUNNU, S., SUNDHOLM, F., JAMSA, S., VIITANIEMI, P. *Structure of thermally modified wood studied by liquid state NMR measurements*. Holzforschung, 2002.
- HILL, Callum. *Wood modification – chemical, thermal and other processes*. Vyd. John Wiley & Sons, ltd. Wiley series in renewable resources, 2006. ISBN 978-0470021729
- HORAČEK, Petr. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. 1. vyd. Brno: Mendelova zemědělska a lesnicka univerzita v Brně, 2008. 124 s. ISBN 80-7157-347-7.

- JÄMSÄ, S., VIITANIEMI, P. *Heat treatment of wood – Better durability without Chemicals*. In: Proceedings of special seminar held in Antibes, France, 2001.
- KAMDEM, D., PIZZI, A., JERMANNAUD, A. *Durability of heat-treated wood*. Holz als Roh- und Werkstoff, 2002. DOI 10.1007/s00107-001-0261-1
- KOLLMANN, F. 1951. *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. 1. auflage. Berlin: Springer - Verlag, 870 s.
- KOLLMANN, F. SCHNEIDER, A. *On sorption behaviour of heat stabilized wood*. Holz als Roh- und Werkstoff, 1963.
- KORKUT, S., KOK, M., KORKUT, D., GURLEYEN, T. *The effects of heat treatment on technological properties in Red-bud maple (Acer trautvetteri Medw.) wood*. Bioresource Technolgy. 2008.
- KŘÍŽENECKÁ, Sylvie. *Základy analytické chemie*. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně. Fakulta životního prostředí, 2007.
- LEXA, J. 1952. *Mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva*. Bratislava: Praca.
- MAYES, D., OKSANEN, O. *Thermowood Handbook*. Stora Enzo Timber Finforest, 2002.
- MILITZ, Holger. *Heat treatment of wood: European processes and their background*. In. International Research Group Wood Preservation, 2002. Doc. No. IRG/WP 02 – 40241.
- MORSIG, N. *Densification of wood – The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain*. Technical University of Denmark, 2000.
- NUOPPONEN, M., VUORINEN, T., JÄMSÄ, S., VIITANIEMI, P. *Thermal modifications in softwood studied by FTIR and UV resonance Raman spectroscopy*. Journal of Wood Chemistry and Technology, 2004. DOI 10.1081/WCT-120035941
- PECINA, H., PAPRZYCKI, O. *Wechselbeziehungen zwischen der Temperaturbehandlung des Holzes seiner Benetzbarkeit*. Holz. Holzverwet, 1988.

- PÉTRISSANS, M. PHILIPPE, G., EL BAKALI, I., and SERRAJ, M. *Wettability of heat – treated Wood*. *Holzforschung*, 2003. DOI 10.1515/HF.2003.045
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd. /. Bratislava: Priroda, 1993. ISBN 80-07-00600-1.
- RAPP, Andreas, O. *Review on heat treatments of wood*. Hamburg: BFH, 2001. ISBN 3 – 926 301 – 02 – 3
- REINPRECHT, Ladislav. *Ochrana dreva: vysokoškolská učebnica*. 1. vyd. Zvolen: Technická univerzita, 2008. ISBN 978-80-228-1863-6.
- SAILER, M., RAPP, A., LEITHOFF, H. *Improved resistance of Scots pine and spruce by application of an oil-heat treatment*. In: International Research Group Wood Preservation, 2000. Doc. No. IRG/WP 00 – 40162.
- SANDBERG, D, NAVI, P. *Thermo-hydro-mechanical Processing of Wood*. Lausanne, EPFL Press, 2011. ISBN 978-2-940222-41-1
- SEBORG, R., TARKOW, H., STAMM, A. *Effect of heat upon the dimensional stabilization of wood*. *Journal of the Forest Products Research Society*, 1953. 3(9):59–67.
- SIVONEN, H., MAUNU, S.L., SUNDHOLM, F., JÄMSÄ, S., VIITANIEMI, P. *Magnetic resonance studies of thermally modified wood*. *Holzforschung*, 2002. DOI 10.1515/HF.2002.098
- SUNDQIST, B. *Colour changes and acid formation in wood during heating*. Doctoral Thesis. Lulea University of Technology. Skelleftea, Sweden, 2004.
- SYRJÄNEN, T., KANGAS, E. *Heat – treated timber in Finland*. Integrational Research Group Wood Pre, 2000. Doc. No. IRG/WP 00 – 40158.
- TJEERDSMA, B., BOONSTRA, M., PIZZI, A., TEKELY, P., MILITZ, H. *Characterisation of thermally modified wood: Molecular reasons for wood performance improvement*. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 1998a. ISSN 0018-3768
- TJEERDSMA, B. F., BOONSTRA M., MILITZ, H. *Thermal Modification of Non-Durable Wood Species. 2. Improved wood properties of thermally treated wood*.

- International Research Group on Wood Preservation, 1998b. Doc. No. IRG/WP 98-40124.
- TJEERDSMA, B. STEVENS, M., MILITZ, H. *Durability aspects of hydrothermal treated wood*. International Research Group Wood. Hawaii, USA, 2000. IRG/WP 00-40160
- TJEERDSMA, B. STEVENS, M., MILITZ, H. VAN ACKER, J. *Effect of proces conditions on moisture content and decay resistance of hydro – therally treated wood*. Holzverwert, 2002.
- UNSAL, O., AYRILMIS, N. *Variations in compression strenght and surface roughness of heat – treated Turkish river red gum*. Journal of Wood Science, 2005. DOI 10.1007/s10086-004-0655-x
- VERNOIS, M. *Heat treatment of wood in france – State of the art*. Technique du Bois et de l’Ameublement. Paris, France, 2000.
- WAGENFUHR, R. 2000. *Holz atlas*. Fachbucverlag Leipzig.
- WEILAND, J.J., GUYONNET, R. *Study of chemical modifications and fungi degradation of thermally modified wood using DRIFT spectroscopy*. Holz als Roh- und Werkstoff, 2003. DOI 10.1007/s00107-003-0364-y
- WELZBACHER, C., RAPP, O. *Comparison of thermally modified wood originating from four industrial scale processes – durability*. International Research Group Wood Pre.UK, Wales, 2002. IRG/WP 02-40229
- VIITANIEMI, P., JÄMSÄ, S., and VIITANEN, H. *Method for improving biodegradation resistance and dimensional stability of cellulosic products*. United States Patent, 1997. No 5678324 (US005678324).
- YILDIZ, S. *Physical, mechanical, technological and chemical properties of beech and spruce wood treated by heating*. PhD dissertation, Karadeniz Tech. Univ. Trabzon, Turkey. 2002.

### **Citované normy:**

ČSN EN 335. *Trvanlivost dřeva a materiálů na bázi dřeva - Třídy použití: definice, aplikace na rostlé dřevo a na výrobky na bázi dřeva*. Český normalizační institut, 2007. Třídící znak 490080.

ČSN 49 0103. *Dřevo. Zistovanie vlhkosti pri fyzikálnych a mechanických skúškach*. Český normalizační institut, 1979. Třídící znak 490103.

ČSN 49 0104. *Skúšky vlastností rasteného dreva. Metóda zisťovania nasiakavosti a navlhavosti*. Český normalizační institut, 1988. Třídící znak 490103.

ČSN EN ISO 6506-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda*. Český normalizační institut, 2006. Třídící znak 420359

BS 373-1957. *Methods of testing small clear specimens of timber*. Timber Industry Standards Committee, 1957. ISBN 0 580 00684 0

### **Citované internetové zdroje:**

ThermoWood. *International Thermowood association*. [online]. 2013 [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.thermowood.fi/>

Gundlach Mark. *Tolerancing in Flexo and Offset Printing. X-rite Pantone*. [online]. 2015 [cit. 2016-04-03]. Dostupné z: <http://blog.xrite.com/tolerancing-in-flexo-and-offset-printing/>

Platonized sustainable wood from Platowood. *Platowood*. [online]. 2015 [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.platowood.com/>

Perdure/PCI Industries. *Perdure*. [online]. 2003 [cit. 2016-03-26]. Dostupné z: <http://www.perdure.com>



## 10 Seznam obrázků

Obrázek 1:	Množství energie (Non – renewable / renewable; neobnovitelné / obnovitelné) potřebné na výrobu a dopravu m <sup>3</sup> daného výrobku. (ThermoWood ©2013) ..... 11
Obrázek 2:	Závislost mezi ASE (účinek proti sesychání), teplotou modifikace a úbytkem hmotnosti (weight loss) pro <i>Picea abies</i> . (Welzbacher a kol. 2007) ..... 17
Obrázek 3:	Závislost mezi časem úpravy a ztrátou hmotnosti při různých teplotách pro borovici. Treatment time = čas úpravy; Mass loss = hmotnostní ztráta. (Esteves a kol. 2008a) ..... 18
Obrázek 4:	Sorpčního izoterma pro bukové dřevo neupravené (non – treated) a pro dřevo upravené PLATO procesem (heat – treated). Osa X: Relative Humidity = relativní vlhkost (prostředí); Osa Y: Equilibrium Moisture content = rovnovážná vlhkost (dřeva). (Tjeerdsma a kol. 1999b) ..... 27
Obrázek 5:	MOR (mez pevnosti v ohybu) výsledky tří – bodého ohybu pro referenční (control) a tepelně upravené vzorky (180 °C a 200 °C). Zleva buk, topol, smrk, dub. (Čermák 2013) ..... 27
Obrázek 6:	MOE (modul pružnosti) výsledky tří – bodého ohybu pro referenční (control) a tepelně upravené vzorky (180 °C a 200 °C). (Čermák 2013) ..... 28
Obrázek 7:	Porovnání výsledků MOR tepelně upraveného dřeva metodou PLATO a neupraveného dřeva. Zleva: buk, smrk, douglaska, borovice ztepilá, borovice paprsčitá. (Tjeerdsma a kol. 1999b) ..... 28
Obrázek 8:	Schéma výroby potřebných vzorků ..... 31
Obrázek 9:	Příprava vzorků pro tepelnou modifikaci (foto autor) ..... 31
Obrázek 10:	Tělíska uložená v hydraulickém lisu, porovnání upravených (40 min) a neupravených vzorků (foto autor) ..... 33
Obrázek 11:	Zařízení core - microtome a vzorky odřezaných vrstev (foto autor) ..... 35
Obrázek 12:	kulový mlýn a homogenizované vzorky (foto autor) ..... 36
Obrázek 13:	Extrakt vzniklý z dřevní hmoty, lze pozorovat pozvolný přechod zbarvení jednotlivých vrstev. Vzorky 1 – 4 pro tepelnou úpravu 15 min, vzorky 5 – 8 pro tepelnou úpravu 40 min (foto Paschová 2016) ..... 37

Obrázek 14:	Vzorky připravené pro spektrofotometrické měření koncentrace sacharidových a fenolických látek (foto Paschová 2016).....	37
Obrázek 15:	Univerzální zařízení Zwick, měření tvrdosti (foto autor) .....	39
Obrázek 16:	Schéma a důležité parametry ohybového namáhání .....	40
Obrázek 17:	Spektrofotometr - měření barevného odstínu povrchu vzorků (foto autor).....	41
Obrázek 18:	Rovnoměrná kolorimetrická soustava CIELAB (Gundlach ©2015) ....	41
Obrázek 19:	Směr působení tepelné modifikace podle orientace vzorků.....	43
Obrázek 20:	Krabicový graf pro hodnoty rovnovážné vlhkosti dřeva.....	46
Obrázek 21:	Průměrné hodnoty relativní vlhkosti dřeva pro jednotlivé soubory.....	46
Obrázek 22:	Krabicový graf pro rozdíly hmotností před a po tepelné úpravě.....	48
Obrázek 23:	Průměrná hmotnost před úpravou a po úpravě.....	49
Obrázek 24:	Krabicový graf pro rozdíl hustot před a po úpravě .....	51
Obrázek 25:	Průměrná hustota před úpravou a po úpravě.....	51
Obrázek 26:	Krabicový graf pro rozdíl nasáklivosti před a po máčení .....	53
Obrázek 27:	Průměrné hodnoty hmotností naměřené před a po testu nasáklivosti ...	54
Obrázek 28:	Nárůst průměrné hmotnosti souborů v závislosti na čase .....	54
Obrázek 29:	Obsah monosacharidů v gramu dřevní hmoty .....	55
Obrázek 30:	Obsah fenolických látek v gramu dřevní hmoty .....	56
Obrázek 31:	Porovnání obsahu monosacharidových a fenolických látek .....	57
Obrázek 32:	Krabicový graf pro soubory tvrdosti po odstranění extrémních hodnot	59
Obrázek 33:	Průměrné hodnoty sil vtisku pro jednotlivé soubory .....	59
Obrázek 34:	Závislost síly vtisku na hustotě .....	60
Obrázek 35:	Krabicový graf pro modul pružnosti po odstranění extrémních hodnot	62
Obrázek 36:	Průměrné hodnoty modulů pružnosti pro jednotlivé soubory.....	62
Obrázek 37:	Závislost modulu pružnosti na hustotě.....	63
Obrázek 38:	Krabicový graf pro mez pevnosti po odstranění extrémních hodnot ....	65
Obrázek 39:	Průměrné hodnoty mezí pevnosti pro jednotlivé soubory.....	65
Obrázek 40:	Graf závislosti meze pevnosti na hustotě .....	66

## 11 Seznam tabulek

Tabulka 1:	Zjednodušená tabulka klasifikace tříd ohrožení v kombinaci s třídami odolnosti pro dřevo. (ČSN EN 335) .....	19
Tabulka 2:	Výtah vybraných fyzikálních vlastností buku ze světových literatur, zabývající se danou problematikou.....	25
Tabulka 3:	Výtah vybraných mechanických vlastností buku ze světových literatur, zabývající se danou problematikou (   - podélný směr, ⊥ - kolmý směr) .....	25
Tabulka 4:	Hodnoty objemové hmotnosti (density) a RVD (EMC) pro referenční (control) a ošetřené vzorky (180 °C a 200 °C). (Čermák 2013).....	26
Tabulka 5:	Počet vzorků a časové intervaly modifikace.....	30
Tabulka 6:	Vzhled tabulek zobrazující statistické veličiny.....	43
Tabulka 7:	Výsledky testů statistické analýzy pro rovnovážnou vlhkost .....	45
Tabulka 8:	Hodnoty statistických veličin pro obsah vlhkosti .....	45
Tabulka 9:	Výsledky testů statistické analýzy pro rovnovážnou vlhkost .....	47
Tabulka 10:	Hodnoty statistických veličin naměřených hmotností před a po úpravě .....	48
Tabulka 11:	Výsledky testů statistické analýzy pro rovnovážnou vlhkost .....	50
Tabulka 12:	Hodnoty statistických veličin pro hustoty před a po úpravě .....	50
Tabulka 13:	Výsledky testů statistické analýzy pro nasákavost.....	52
Tabulka 14:	Hodnoty statistických veličin pro nasákavost před a po zkoušce .....	53
Tabulka 15:	Výsledky testů statistické analýzy pro tvrdost .....	58
Tabulka 16:	Hodnoty statistických veličin pro sílu vtisku .....	58
Tabulka 17:	Výsledky testů statistické analýzy pro modul pružnosti .....	61
Tabulka 18:	Hodnoty statistických veličin modulu pružnosti.....	61
Tabulka 19:	Výsledky testů statistické analýzy pro mez pevnosti .....	64
Tabulka 20:	Hodnoty statistických veličin meze pevnosti .....	64
Tabulka 21:	Průměrné hodnoty získaných parametrů určující body v rovnoměrné kolorimetrické soustavě CIELAB.....	67

## 12 Seznam rovnic

Rovnice 1:	Stanovení vlhkosti dřeva pomocí váhové metody .....	33
Rovnice 2:	Výpočet hustoty .....	34
Rovnice 3:	Výpočet hmotnostního rozdílu .....	34
Rovnice 5:	Statická tvrdost dle Brinella .....	38
Rovnice 6:	Průměr otláčené plochy .....	38
Rovnice 4:	Odchylá barevného spektra .....	40